



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

# **RISTIKKORAKENTEIDEN 3D-TULOSTAMISEN SUUNNITTELU METALLILLE**

Sami Lehtosaari

Ohjaaja: Juhani Niskanen

KONETEKNIIKAN TUTKINTO-OHJELMA

Diplomityö 2020

# TIIVISTELMÄ

Ristikkorakenteiden 3D-tulostamisen suunnittelu metallille

Sami Lehtosaari

Oulun yliopisto, Konetekniikan tutkinto-ohjelma

Diplomityö 2020, 51 s. + 4 liitettä

Työn ohjaaja yliopistolla: Juhani Niskanen

Metallin 3D-tulostaminen mahdollistaa monimutkaisten ja pienten rakenteiden luomisen. Tämä on mahdollistanut pienten ristikkorakenteiden luomisen ja niiden käytön. Hyötynä tästä on erilaisen ominaisuuksien saaminen eri rakenteiden avulla. Lisäksi materiaalin kulutus pienenee ja tulostusprosessi nopeutuu. Ristikkorakenteiden 3D-tulostamista metallille on tutkittu hyvin vähän, koska se on suhteellisen uusi asia. Ristikkorakenteiden suunnittelussa Metso Flow Control Oy:ssä käytetään elementtimenetelmiin perustuvia työkaluja ja esikäsittelijöitä, joilla optimoidaan, tutkitaan ja luodaan rakenteita. Ohjelmistot kehittyvät koko ajan monipuolisimmiksi ristikkorakenteiden ja niiden käytön kannalta.

Tässä työssä tutkittiin, mitä suunnittelijan tulisi ottaa huomioon ristikkorakenteita käytettäessä, jotta saadaan halutut mekaaniset ominaisuudet. Työssä myös kiinnitettiin huomiota valmistettavuuteen. Tutkimusmenetelminä käytettiin ohjelmiston eri ominaisuuksia, joita verrattiin keskenään. Lopuksi käytännön kokeen avulla verrattiin simuloinnin tuloksia keskenään.

*Asiasanat: 3D-tulostus, ristikkorakenne, simulaatio*

# ABSTRACT

Design of 3D-printing of lattice structures on metal

Sami Lehtosaari

University of Oulu, Degree Programme of Mechanical Engineering

Master's thesis 2020, 51 p. + 4 Appendixes

Supervisor at the university: Juhani Niskanen

3D-printing of metal allows the creation of complex and small structures. This has made it possible to create and use small lattice structures. The advantage of this is to obtain different properties by means of different structures. In addition, material consumption is reduced and the printing process is speeded up. Very little research has been done on 3D-printing of lattice structures on metal because it is a relatively new thing. In the design of lattice structures, Metso Flow Control Oy uses tools and pre-processors based on element methods to optimize and create structures. The software is constantly evolving to be the most versatile in terms of lattice structures and their use.

In this work, it was investigated what the designer should take into account when using truss structures in order to obtain the desired mechanical properties. Attention was also paid to manufacturability in the work. The research methods used different features of the software, which were compared with each other. Finally, a practical experiment was used to compare the results of the simulation.

*Keywords: 3D-printing, lattice, simulation*

# ALKUSANAT

Diplomityö on tehty Vantaan Hakkilassa Metso Flow Control Oy:lle. Haluan kiittää työnohjaajaa DI Tommi Bergströmiä mielenkiintoisesta aiheesta sekä työn aikana kirjallisen osuuden neuvoista.

Haluan myös kiittää Oulun yliopiston laboratorion työntekijöitä heidän avustaan työn kokeellisen osuuden aikana. Suuret kiitokset myös EdrMedesolle ja heidän työntekijälle Alexandre Hiticoiu:lle opastuksesta Ansyksen käytöstä ristikkorakenteiden mallinnuksessa ja simuloinnissa.

Lopuksi osoitan kiitokset Oulun Yliopiston konetekniikan professori Juhani Niskaselle työn ohjaamisesta ja palautteesta.

Vantaa, 27.05.2020

*Sami Lehtosaari*  
Työn tekijä

# SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO .....	7
2 RISTIKKORAKENTEIDEN JAKO .....	9
2.1 Säännöllinen rakenne .....	10
2.2 Kaksiulotteinen rakenne .....	10
2.3 Kolmiulotteinen rakenne .....	12
2.3.1 Ristikkorakenne .....	12
2.3.2 Minimaalinen pintarakenne .....	14
3 OMINAISUUKSIEN MÄÄRITTÄMINEN .....	16
3.1 Maxwell vakauskriteeri .....	16
3.2 Taivutushallittu rakenne .....	18
3.3 Jännityshallittu rakenne .....	19
4 VALMISTUSMENETELMÄ .....	21
4.1 Jauhepetisulatustekniikat .....	21
4.2 Suorakerrostustekniikat .....	22
4.3 Teknologiat metallin 3D-tulostamiselle .....	22
4.4 Suora metallinlasersintraus .....	23
4.5 Solumaisten rakenteiden tulostustekniikan ja suunnittelun rajat .....	24
4.6 3D-tulostuksen hyödyt ja haitat .....	27
5 SUUNNITTELUMENETELMÄT .....	28
5.1 Ristikkorakenteen lisääminen kiinteään rakenteeseen .....	28
5.2 Ristikkorakenteen sisällyttäminen materiaalimallina .....	30
5.3 Ristikkorakenteen optimointi .....	32
5.4 Koekappaleen suunnittelu .....	32
6 RISTIKKORAKENTEIDEN TESTAUS .....	35
6.1 Ristikkorakenteiden vertailu .....	35
6.2 Geometrisen ristikkorakenteen vertailu materiaalimalliin .....	35
6.3 Ristikkorakenteen optimoinnin simulointi .....	36
6.4 Vetosauvojen simulointi .....	36

7 3D-TULOSTUS .....	37
8 VETOKOE .....	41
9 TULOKSET .....	43
9.1 Ristikkorakenteiden vertailun tulokset.....	43
9.2 Geometrisen ristikkorakenteen ja materiaalmalliin vertailun tulokset .....	44
9.3 Optimoinnin tulokset.....	45
9.4 Simuloitujen vetokokeiden tulokset.....	46
9.5 Vetokokeen tulokset.....	47
10 TULOSTEN TARKASTELU .....	48
10.1 Ristikkorakenteiden vertailun tulokset.....	48
10.2 Materiaalmallin tulokset .....	48
10.3 Ristikkorakenteen optimoinnin tulokset .....	49
10.4 Vetokokeen simulointituloksien vertailu kokeelliseen .....	49
11 JATKOKEHITYSEHDOTUKSET .....	50
12 YHTEENVETO .....	51
Liite 1 SFS 3475 Standardi	
Liite 2 Ristikkorakenteiden vertailun tulokset	
Liite 3 Simuloitujen koekappaleiden tulokset	
Liite 4 Vetokokeen tulokset	

# 1 JOHDANTO

3D-tulostaminen on yleistynyt ja kehittyy koko ajan. Tulostimia on erilaisilla teknologioilla, ja ne on tehty eri käyttötarkoituksiin ja eri materiaaleille. Monipuolisuuden ja ennen kaikkea materiaalien laajan valikoiman ansiosta teollisuus on kiinnostunut 3D-tulostamisen mahdollisuuksista. Kiinnostavimpia kohteita ovat yksilöllisen rakenteen tekeminen, työvaiheiden vähentäminen ja monimutkaisten rakenteiden luominen. Kiinteiden kappaleiden sisälle pystytään luomaan erilaisia rakenteita, jotka ennen olivat mahdottomia tai kannattamattomia tehdä perinteisillä valmistusmenetelmillä. Erilaisten ristikkorakenteiden luominen auttaa painon ja materiaalin säästössä, joiden ansiosta kustannukset saadaan pienemmiksi. Rakenteita voidaan myös soveltaa melun vaimennukseen, lämmön ja virtauksen hallintaan.

Uuden teknologian takia tietämys 3D-tulostettavista ristikkorakenteista ja niiden ominaisuuksista on hyvin vähäistä. Tässä työssä tutkitaan, mitä suunnittelijan tulisi ottaa huomioon ristikkorakenteita käytettäessä, jotta saadaan halutut mekaaniset ominaisuudet täytettyä. Työssä on myös tarkoitus kiinnittää huomiota valmistettavuuteen ja rajoittaviin tekijöihin, jotta kappale olisi mahdollista 3D-tulostaa.

Työltä odotetaan tietoa eri ristikkorakenteiden ominaisuuksista ja niiden mahdollisista käyttötarkoituksista, sekä eri suunnittelutapojen ymmärtämisestä ja soveltamisesta käyttötarkoituksen mukaan. Simulointimallien ja käytännön kokeiden odotetaan vastaavan toisiaan. Ulkoisten tekijöiden tuomia eroja käytännön kokeen ja simuloinnin kanssa pyritään välttämään suorittamalla kokeet standardi olosuhteissa.

Tutkimuskysymykset:

-Miten ristikkorakenteet pitää suunnitella ja mikä on suunnitteluprosessi siten, että ne täyttävät halutut mekaaniset ominaisuudet ja ne ovat valmistettavissa 3D-tulostusteknologialla?

-Mitä tietoja ristikkorakenteista ja niiden valmistusprosesseista suunnittelijalla pitää olla, että hän voi soveltaa tietoa suunnittelutyössä?

- Miten valitaan sopivin ristikkorakennetyyppi käyttötarkoituksen mukaan?
- Mitkä ovat rajoittavat tekijät?

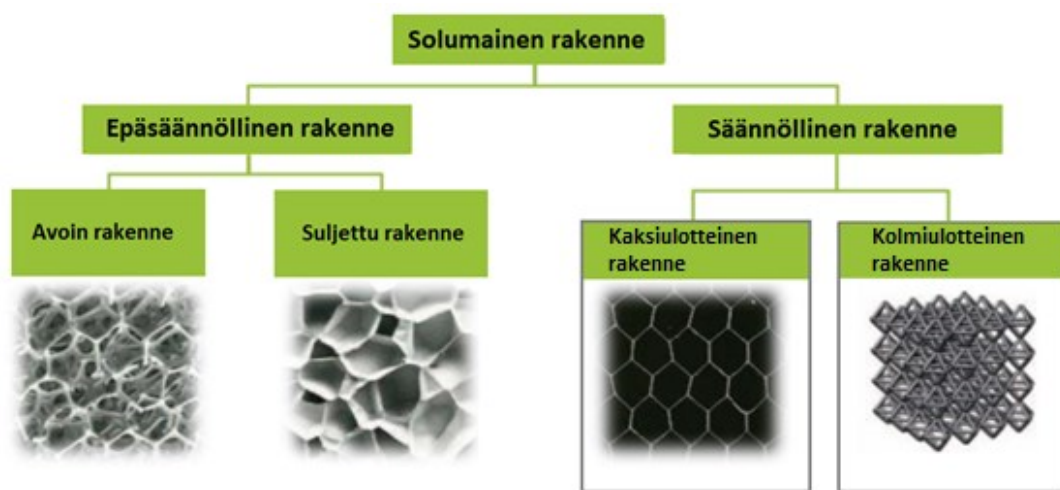


## 2 RISTIKKORAKENTEIDEN JAKO

Solumaisessa rakenteessa tarkoitus on laittaa materiaalia vain sinne missä se on tarpeen tietyn sovelluksen kannalta. Mekaanisen suunnittelun kannalta solumaisten rakenteiden etu on suuri lujuus, johon liittyy suhteellisen pieni massa. Nämä voivat tarjota hyviä energian säilömisominaisuuksia, sekä lämmön- että äänieristysominaisuuksia. Solumaisiin rakenteisiin kuuluvat vaahdot, kennot, ristikot ja vastaavat rakenteet. (Nguyen ym. 2012)

Viime vuosien aikana ristikkorakenteet ovat saaneet huomattavaa huomiota kevyiden, jäykkien ja vahvojen rakenteiden aikaansaamisessa. (Nguyen ym. 2012)

Solumainen rakenne yleensä jaetaan huokoisuustyyppin mukaan avoimeksi tai suljetuksi ja kennorakenteen mukaan epäsäännölliseksi tai säännölliseksi. Tyypillisimpiä solumaisia rakenteita ovat: vaahdot, hunajakenno, ristikko ja vastaavat rakenteet. (Nguyen ym. 2012) Kuvassa 1 on esitetty solumaisen rakenteen tyypit.



Kuva 1. Solumaisen rakenteen tyypit (mukaillen Illgner ym.2017).

Solumaista rakennetta, jota ei voi luokitella yhdellä kennorakenteen alueella, kutsutaan epäsäännölliseksi vaahdoksi. Satunnaisjärjestyneillä, kuten vaahdoilla, on erinomaiset lämpö- ja akustiset ominaisuudet. (Azman 2017)

Järjestäytyneillä rakenteilla, kuten hunajakkenno- ja ristikkorakenteilla, on erinomainen lujuus, jäykkyys ja energian säilöminen, jotka ovat tärkeitä lämmönsiirt ominaisuuksille. (Mahmoud ym. 2017)

Suurin rajoittava tekijä satunnaisjärjestäytyneillä rakenteilla on suunnittelijan vapauden puute. (Rosen ym. 2006)

## **2.1 Säännöllinen rakenne**

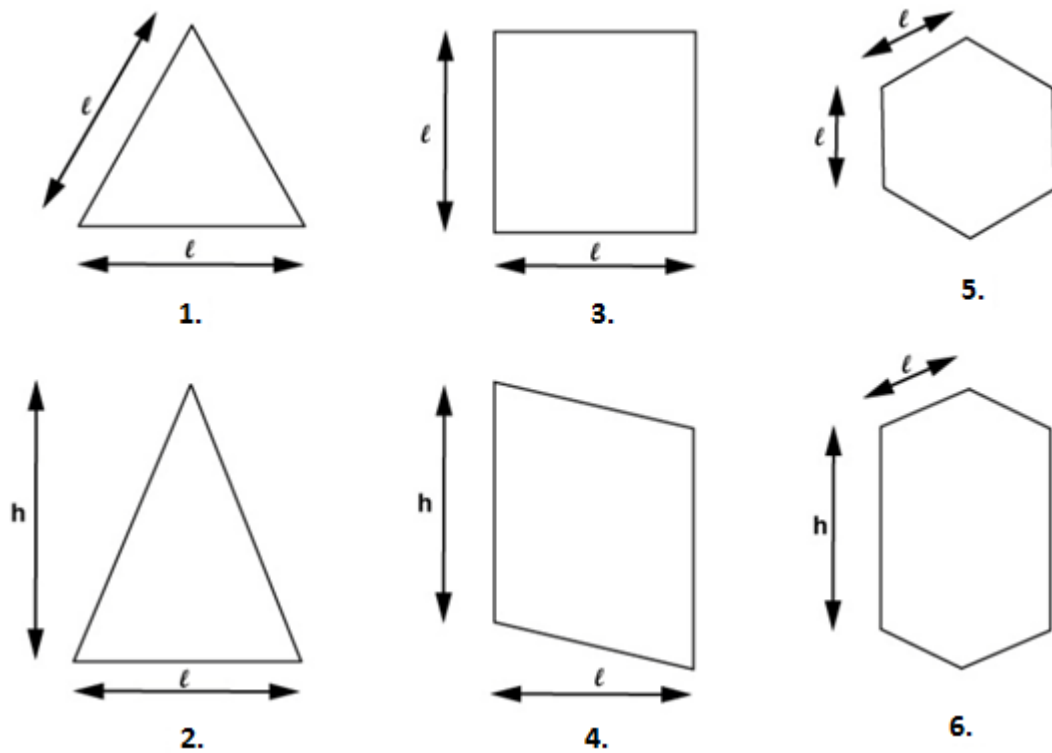
Jaksollisia rakenteita on olemassa kahta eri tyyppiä solumaisessa rakenteessa. Ensimmäinen tyyppi jaksollisessa rakenteessa on kaksiulotteinen, joka tunnetaan prismaattisen nimellä. Toinen tyyppi jaksollisessa rakenteessa on kolmiulotteinen. Tämä tarkoittaa sitä, että sen yksikkökennot ovat kolmessa tasossa. Näitä rakenteita kutsutaan usein ristikkorakenteiksi. (Azman 2017)

## **2.2 Kaksiulotteinen rakenne**

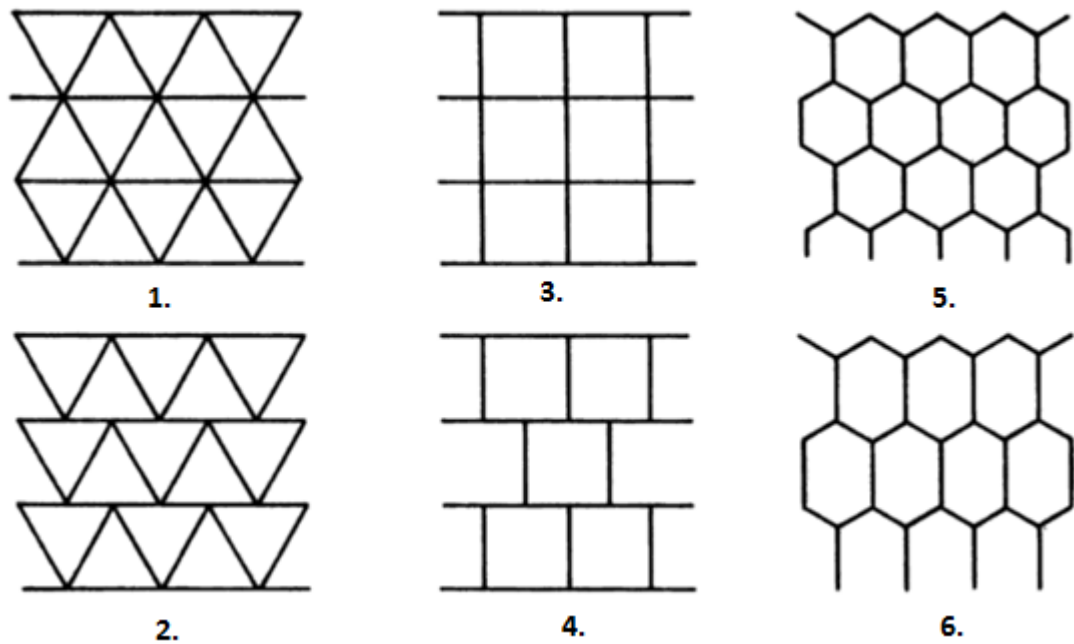
Säännöllistä kahdessa tasossa suunniteltuja rakenteita kutsutaan usein hunajakkennoiksi. Koska hunajakennot ovat houkuttelevia käytettäväksi voileipäarakenteiden keskellä energian absorboitumista ja pakkaamista varten kevyinä rakenneosina tai käytettäväksi lämmönsiirtolaitteissa, niiden mekaaniset ominaisuudet ovat saaneet merkittävää huomiota. (Wang yms. 2005)

Yleisimmät yksikkökennojen rakenteen muodot ovat kuusikulmio, neliö ja kolmio. Kuusikulmion rakenteessa yksikkökennot kiinnittyvät toisiinsa reunapisteessä, jossa kolmen kennon reunat yhdistyvät. Neliö- ja kolmiorakenteissa yhdistyviä kennoja on neljä tai kuusi. Tämän takia nämä ovat kuitenkin vähemmän tehokkaita siinä mielessä, että ne käyttävät enemmän kiinteätä ainetta sulkemaan saman huokostilavuuden. (Gibson yms 2001)

Yleisimmät kaksiulotteiset yksikkökennojen muodot on esitetty kuvassa 2, jotka ovat käytettävissä sekä isotrooppisille että anisotrooppisille kennoille. Jopa kennojen muotojen ollessa kiinteät, solut voidaan pinota useammalla kuin yhdellä tavalla (kuva 3), jolloin saadaan rakenteita, joilla on erilaiset reunayhteydet ja erilaiset ominaisuudet. (Gibson yms 2001)



Kuva 2. Kaksiulotteisia yksikkökennojen muotoja (mukaiillen Gibson yms 2001)



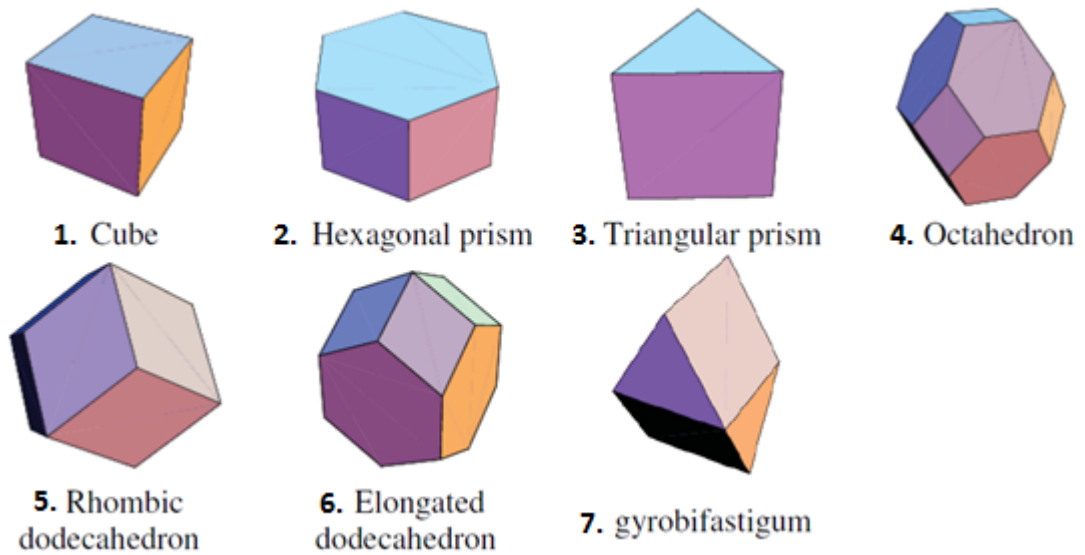
Kuva 3. Yksikkökennojen pinoaminen eri tavoilla. (mukaiillen Gibson yms 2001)

## 2.3 Kolmiulotteinen rakenne

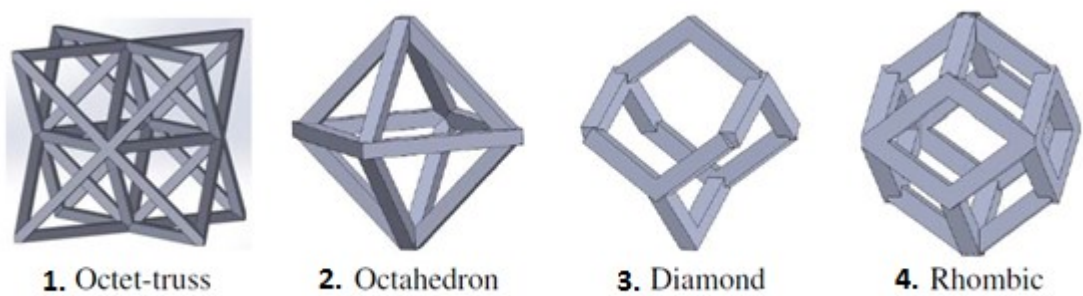
Ristikkorakenteet ovat ainutlaatuinen solurakenteiden luokka. Tämän tyyppiset rakenteet koostuvat palkeista ja solmuista, joilla on tietty toistuva järjestys kolmiulotteisessa tilassa. Eri solurakenteiden joukosta ristikkorakenteet ovat houkuttelevin tyyppi. Ensinnäkin, ristikkorakenteesta tarvitsee määrittää vain yhden yksikkökennon ominaisuudet, jotta ominaisuudet saadaan määritettyä koko rakenteelle. Siksi tämäntyyppinen rakenne antaa suunnittelijoille paljon enemmän vapautta toteuttaa suunnittelutavoitteensa. Tämän lisäksi ristikkorakenteet voidaan myös suunnitella venytys-hallituksi rakenteeksi, jolla on korkea jäykkyys kuormitusta varten. Vaihtoehtoisesti rakenne pystytään suunnittelemaan taivutus-hallituksi, joka mahdollistaa suuren muodonmuutoskyvyn. Edellä mainituista syistä ristikkorakenteilla on suuri potentiaali monissa sovelluksissa, kuten auto-, ilmailu- ja lääketieteellisissä laitteissa. (Tang yms 2015)

### 2.3.1 Ristikkorakenne

Jaksollisten ristikkorakenteiden suunnittelu yksikkökennoilla on samanlaista kuin kolmiulotteisten laatoituskuvioiden suunnittelu. Kun malleihin käytetään vain yhden tyyppistä yksikkökenno geometriaa, on sen silti täytettävä tilan täyttövaatimus suunnittelusta riippumatta. Kuva 4 esittää tyypillisimpiä tilaa täyttäviä kolmiulotteisia elementtejä, joita voidaan käyttää kennojen suunnittelussa. Kuutiomaista elementtiä käytetään tällä hetkellä yleisimmin yksikkökennojen suunnitteluun. Kuten kuvassa 5 esitetään, eri yksikkökenno geometriat voidaan suunnitella kuutiomaisella elementillä. Yleensä näillä yksikkökenno geometrioilla on hyvät symmetriat, ja niitä voidaan sen vuoksi yksinkertaistaa edelleen mallinnuksen aikana. (Yang yms 2016)

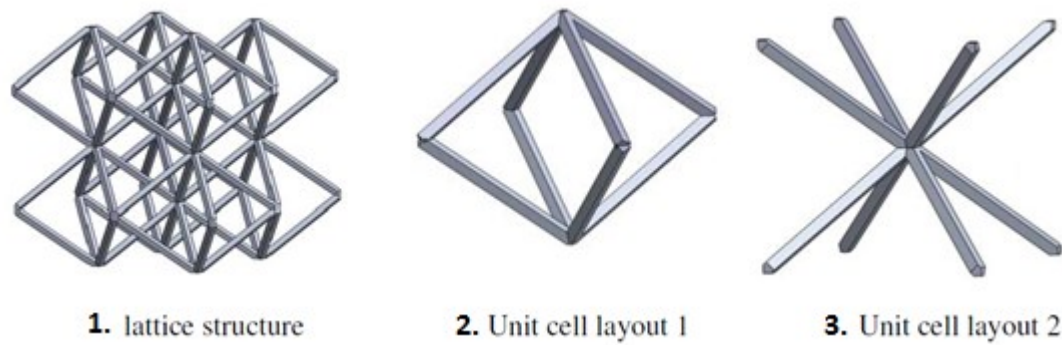


Kuva 4. Tyypillisimmät kolmiulotteiset tilantäyttöelementit (mukaillen Yang yms 2016)



Kuva 5. Kuutiomaisilla elementeillä suunniteltuja yksikkökennoja (mukaillen Yang yms 2016)

Yksi tällainen mallinnusesimerkki esitetään kuvassa 6. Kuvassa 6(1) on esitetty kennorakenne, jonka yksikkökenno voitaisiin esittää kuvan 6(2) tai 6(3) mukaan. Jälkimmäinen yksikkökenno on kuitenkin helpompi mallintaa. Yksikkökennon topologiasta on selvää, että tämän mukainen ristikkorakenteen mekaaniset ominaisuudet kaikissa kolmessa pääsuunnassa voitaisiin mallintaa identtisesti. (Yang yms 2016)



Kuva 6. Kennorakenteen vaihtoehtoiset yksikkökennot (mukaillen Yang yms. 2016)

### 2.3.2 Minimaalinen pintarakenne

Termiä "minimaalinen pinta" käytetään, koska nämä pinnat alun perin syntyivät pintoina, jotka rajoitetusti minimoivat kokonaispinta-alaa. Aluetta minimoitavien pintojen mallit voidaan valmistaa upottamalla lanka saippualliuokseen, jolloin langan päälle saippuasta muodostuu minimaalinen pinta. Termiä käytetään kuitenkin yleisempiin pintoihin, jotka voivat itsessään leikkautua tai joilla ei ole rajoituksia. (Maskery yms. 2017)

Hermann Schwarz kuvaili ensimmäisenä kolmiulotteista jaksollista minimaalista pintarakennetta vuonna 1865. Minimaalisella pintarakenteella kaarevuus on vakio kaikkialla sen pinnalla ja samalla se on säännöllinen kolmessa suunnassa. Kolmiulotteisella jaksollisella minimaalisella pinnalla ei myöskään ole omaa leikkausta, ja se jakaa tilan kahteen erilliseen, mutta toisiinsa sidottuun alaosaan, jotka ovat samanaikaisesti jatkuvia. Kuvassa 7. on kolmen tyypillisintä minimaalista pintarakennetta, jotka ovat tunnettuja yksinkertaisuudestaan: Primitive, Diamond ja Gyroid. (Han yms. 2017)

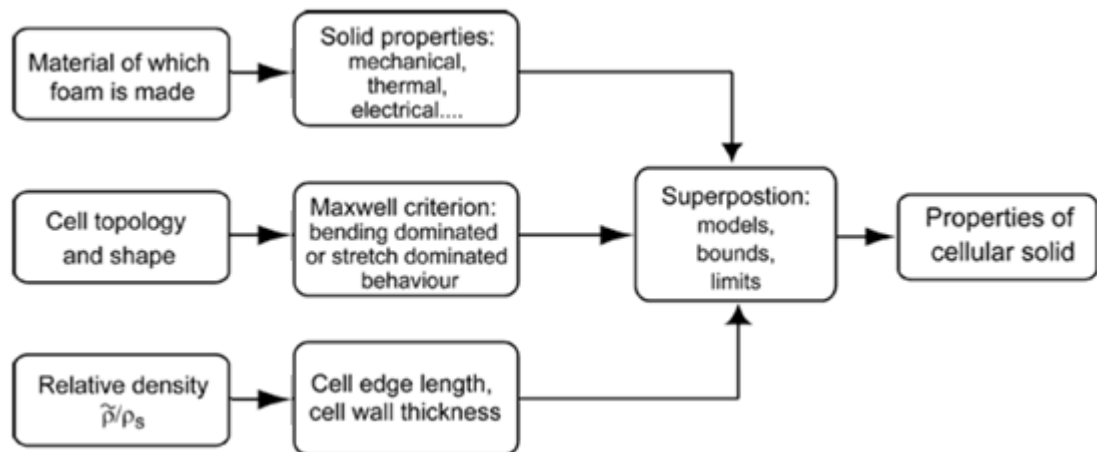


Kuva 7. Tyypillisimmät minimaaliset pintarakenteet (mukaillen Han yms. 2017)

Minimaalisessa pintarakenteessa pinta on sileä ja sillä on vakiokaarevuus. Sen ohuella kuorella ei ole geometrisen epäsäännöllisyyden takia jännityskeskittymää, vaan se pystyy pikemminkin tukemaan ulkoista kuormitusta samansuuntaisilla jännityksillä aiheuttamatta taipumista. Täten minimaalisen pintarakenteen ohut kuori voi toimia jännityshallittuna rakenteena. (Han yms. 2017)

### 3 OMINAISUUKSIEN MÄÄRITTÄMINEN

Solumaisen rakenteen ominaisuudet riippuvat sekä topologiasta että materiaalista. Rakenne voidaan jakaa kolmeen tekijään, joita on tutkittu laajemmin ja juuri näiden tutkimuksien johdosta on saatu suurin osa nykyisestä ymmärryksestä. Viimeaikaiset edistykset metallivaahdoille koskevilla tekniikoilla ovat johtaneet niiden intensiiviseen tutkimukseen. Niiden nopeasti kasvava merkitys erilaisissa osissa on stimuloinut paljon viimeaikaista työtä. Solumaisen rakenteen ominaisuuksiin vaikuttavat peruseriaatteen ovat yhteisiä kaikille kolmelle tekijälle. Kolme hallitsevaa tekijää ovat esitetty kuvassa 8. Ensimmäisenä tekijänä on materiaali ja sen ominaisuudet. Toinen tekijä on kennorakenteen reunojen ja pintojen topologia (liitettävyyden) ja muoto. Kolmas tekijä on suhteellinen tiheys. (Ashby 2005)



Kuva 8. Solumaisen rakenteen ominaisuuksien määrittäminen (mukaillen Ashby 2005)

#### 3.1 Maxwell vakauskriteeri

Jos ristikkorakenteella tuentojen liitokset ovat vähäisiä, on sen jäykkyys myös alhainen, koska kennorakenne sallii taipumisen. Olisiko mahdollista suunnitella rakenne niin, että kennot olisivat jännityshallittuja? Näiden ymmärtämiseksi tarvitaan Maxwellin vakauskriteeri, joka on riittävän yksinkertainen, mutta samalla hyvin perusteellinen sääntö. Se koostuu  $b$  tuista ja  $j$  liitoksista, joka on esitetty kuvassa 9. Se on määritettävissä sekä staattisesti että kinemaattisesti (tarkoittaen, että se on jäykkä eikä ole kokoon taittuva kuormitettuna). Kaksiulotteisen yhtälö on muotoa: (Ashby 2005)



$$M = b - 2j + 3 = 0 \quad (1)$$

missä  $M$  on vakauskriteeri

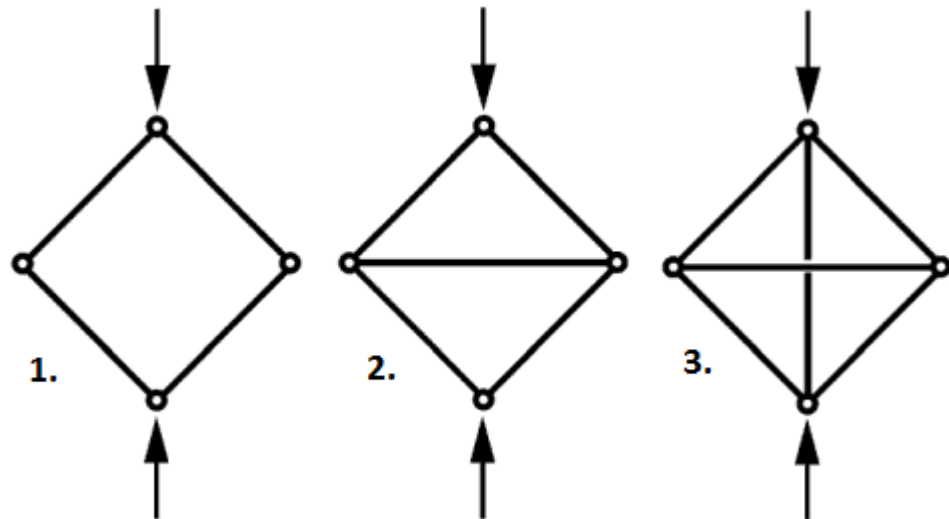
$b$  on tukien määrä ja

$j$  on solmujen määrä

Kolmiulotteisen yhtälö on vastaavasti:

$$M = b - 3j + 6 = 0 \quad (2)$$

Rakenne on mekanismi silloin kun  $M < 0$ , kuten kuvassa 9(1). Siinä on yksi tai useampi vapausaste ja suunnissa, joissa siirtymät sallitaan, sillä ei ole jäykkyyttä tai lujuutta. Jos sen liitokset ovat lukittuja (kuten ne ovat ristikkorakenteessa), kehyksen tangot taipuvat kuormitetussa tilassa. Jos sen sijaan  $M = 0$ , kuten kuvassa 9(2), niin sen kehys lakkaa olemasta mekanismi. Jos sitä kuormitetaan, niin sen osat kantavat jännitystä tai puristusta (jopa nivelöidyissä), ja siitä tulee jännityshallittu rakenne. Liitosten lukitseminen tekee pienen eron, koska kapeat rakenteet ovat jännityksessä paljon jäykempiä kuin taivutettuina. Periaate on esitetty seuraavasti: jännityshallituilla rakenteilla on korkea rakenteellinen hyötysuhde, kuin taas taivutushallituilla rakenteilla se on alhainen. Kuvassa 9(3) esitellään sisäinen jännitys. Sen rakenteessa  $M > 0$ . Jos pystytukea lyhennetään, niin se vetää muut tuet puristukseen ja puristus tasapainottaa kannettua jännitystä. Tuet kantavat jännitystä, vaikka rakenteelle ei kohdistuisi ulkoisia kuormia. (Ashby 2005)

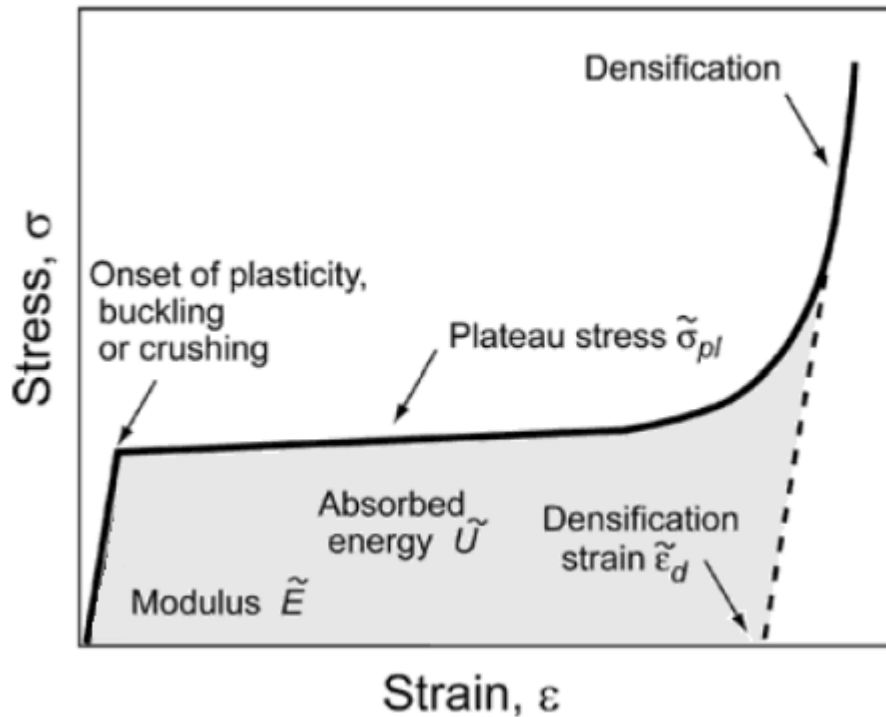


Kuva 9. Erilaisia saranoituja kehyksiä. (mukaillen Ashby 2005)

### 3.2 Taivutushallittu rakenne

Kuva 10 esittää taivutushallitun ristikkorakenteen jännitys-puristuskäyrää. Rakenne on lineaarisesti kimmoinen, sen myötörajaan asti, jonka kohdalla kennon reunat tuottavat venymän, taipuman tai murtuman. Rakenne jatkaa romahtamista melkein tasaisessa jännityksessä, kunnes jännitys nousee jyrkästi kennojen reunojen osuessa toisiinsa. (Ashby 2005)

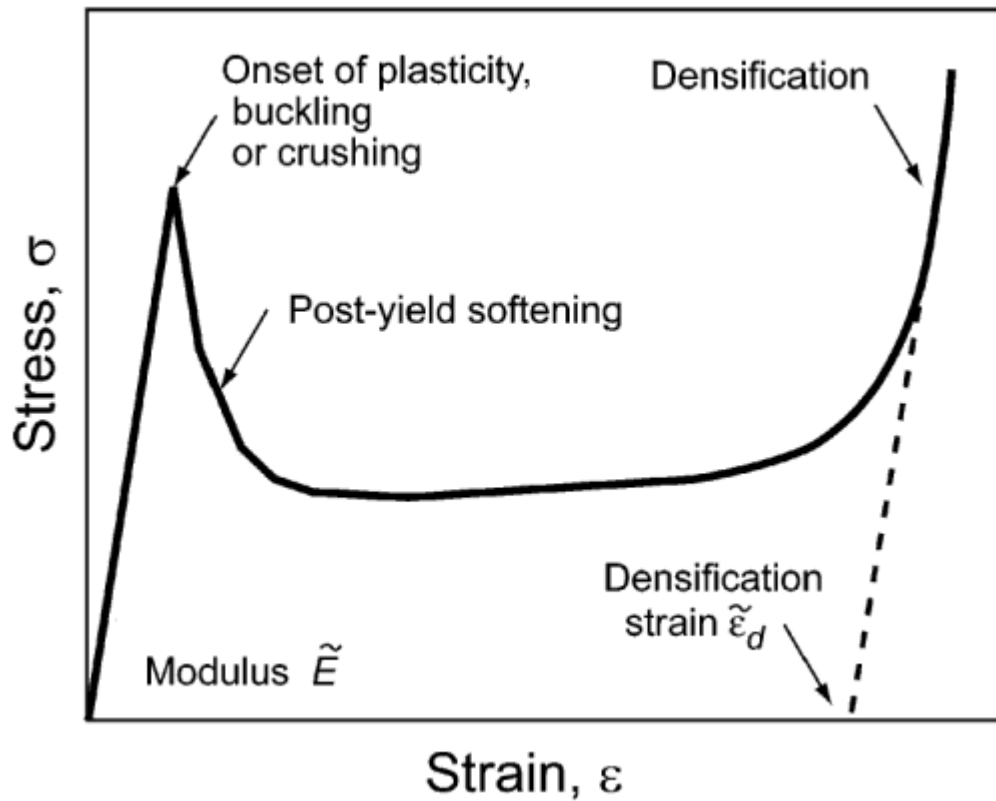
Taivutushallittu rakenne on mahdollista suljetuille ja avoimille rakenteille, vaikka suljetuissa rakenteissa odotetaan pintojen kantavan jännitystä, kun rakenne on kuormitettu. Tosiasiassa pinnat ovat niin ohuita, että ne repeävät jo matalilla jännityksillä, jolloin niiden vaikutus jäykkyyteen ja lujuuteen on pieni. Rakenteet siis kantavat suurimman osan kuormituksesta. (Ashby 2005)



Kuva 10. Taivutushallitun rakenteen jännitys-puristuskäyrä. (mukaillen Ashby 2005)

### 3.3 Jännityshallittu rakenne

Jännityshallitussa rakenteessa kannattaa miettiä vetolujuutta, koska siinä ei ole mekanismeja. Tästä syystä rakenteesta ensin vastaa tuet joustamalla. Keskimäärin kolmasosa sen tuista kantaa jännitystä, kun rakenne on kuormitettu yksinkertaisella jännityksellä, riippumatta kuormitus suunnasta. Plastisuusraja saavutetaan, kun yksi tai useampi tuki alkaa plastisesti myötämään, lommahtamaan tai murtumaan. Oletuksena on myötörajan olevan yläraja, jonka jälkeen käyrä lähtee laskemaan. Jos tuet ovat kapeat, ne voivat lommahtaa. Kuvassa 11 on esitetty jännitys-hallitun rakenteen käyttäytyminen. Jännityshallittu rakenne tarkoittaa sitä, että jännitystä kantavat tuet pettävät ensimmäisinä. (Ashby 2005)



Kuva 11. Jännityshallitun rakenteen jännitys-puristuskäyrä. (mukaillen Ashby 2005)

Tärkeimpänä asiana voidaan pitää sitä, että jännitys-hallitun rakenteen puristuslujuus on paljon suurempi kuin taivutus-hallitulla rakenteella, kun suhteellinen tiheys on yhtä suuri. Tämä tekee jännitys-hallitusta rakenteesta parhaan valinnan kevyiden rakenteiden sovelluksiin. Mutta koska muodonmuutosmekanismeihin sisältyy nyt "kovia" muotoja (jännitys, puristus) ennemmin kuin "pehmeitä" (taipuminen), myötämistä seuraa plastinen lommahdus tai tukien murtuminen. Tämän tekee näistä vähemmän hyviä energianvaimennussovelluksissa, jotka vaativat sellaisen jännitys-venymäkäyrän, jolla on pitkä ja tasainen ylätaso. (Ashby 2005)

## 4 VALMISTUSMENETELMÄ

Ainetta lisäävä valmistus, joka tunnetaan myös nimellä 3D-tulostus, on materiaalien yhdistämisprosessi esineiden valmistamiseksi 3D-mallista. Yleensä valmistus tapahtuu kerros kerrokselta, toisin kuin materiaalia vähentävät valmistusmenetelmät. Tämä työkalu voi antaa teollisuudelle uuden suunnittelun joustavuuden, vähentää energiankulutusta ja nopeuttaa markkinoille saattamisaikaa. (Gibson yms. 2014) Tärkeimmät sovellukset ainetta lisäävään valmistukseen liittyy nopeiden prototyyppien valmistukseen, nopeaan työstämiseen, valmiin kappaleen valmistukseen ja osien korjauksiin. Kaksi tärkeintä parametria minkä tahansa metallisen ainetta lisäävässä valmistusprosessissa ovat osan muodostamiseen käytettävä materiaali ja energialähde. Lisättävä materiaali metallille voi olla jauhe tai lanka. Energialähteenä voi toimia laser, elektronisuihku tai valokaari. (Bhavar 2014)

Metallin ainetta lisäävät valmistusprosessit voidaan luokitella laajasti kahteen pääryhmään, jauhepetisulatustekniikoihin ja suorakerrostustekniikoihin. Näitä molempia tekniikoita voidaan edelleen luokitella käytetyn energialähteen tyypin perusteella. (Duda yms. 2016)

### 4.1 Jauhepetisulatustekniikat

Jauhepetisulatuspohjaisissa tekniikoissa lämpöenergia sulattaa valikoivasti alueita jauhepetiltä. Selektiivinen lasersintraus/-sulatus, suora metallilasersintraus ja elektronisädesulatus ovat pääasiallisia jauhepetisulatuspohjaisia tekniikoita (Bhavar 2014). Jauhepetisulatusprosessissa suora metallilasersintraus käyttää metallijauhetta ja suuritehoista laseria sintratakseen käyttökelpoiset osat yhteen. Tämä menetelmä pystyy tuottamaan erittäin tiheän osan, mutta kaasuihku- tai painetiiviyden saavuttamiseksi jälkikäsittely usein vaaditaan. Useimmat kaupalliset nimet, kuten lasersintraus jne., kuvaavat samaa prosessia, mutta eivät erilaisia tekniikoita. Selektiivinen lasersintraus ja suora metallilasersintraus ovat käsitteellisesti sama prosessi, mutta selektiivisessä lasersintrauksessa käytetään polymeerejä tai päällystettyjä metallijauheita, kun taas suora metallilasersintraus käyttää päällystämättömiä seostettuja metallijauheita sintrausmateriaalina. Elektronisuihkusulatustekniikka käyttää lämmitettyä jauhekerrosta tyhjiössä, joka sitten sulatetaan ja muodostetaan kerros kerrokselta käyttäen

elektronisädetä (energialähteenä), joka on samanlainen kuin elektronisuihkuhitsaus. (Duda yms. 2016)








## **4.2 Suorakerrostustekniikat**

Suorakerrostuspohjaisissa tekniikoissa käytetään keskittynyttä lämpöenergiaa sulattamaan materiaalit (jauhe- tai lankamuodot) sellaisenaan paikoilleen. Laser Engineered Net Shaping, Direct Metal Deposition, Electron Beam Free Form Fabrication ja kaaripohjainen ainetta lisäävä valmistus ovat suosittuja suorakerrostustekniikoita (Bhavar 2014). Suorakerrostus perustuu jauheen injektiojärjestelmään, jossa robottikäteen on sijoitettu kuitulaser. Suorakerrostus sopii hyvin olemassa olevien työkalujen korjaamiseen, ominaisuuksien lisäämiseen suuriin osiin tai uusien osien valmistukseen. Electron Beam Free Form Fabrication käyttää keskittynyttä elektronisädetä tyhjiöympäristössä sulan luomiseksi metalliselle alustalle. Pikaplasmapinnoituksessa käytetään argonplasmaa, jossa metallilanka sulatetaan ja argonkaasu kuljettaa sulat pisarat pohjalevyä kohti, missä osa luodaan kerros kerrokselta. Suorakerrostus metallille on vähemmän yleistä koko osan ainetta lisäävässä valmistuksessa johtuen pääasiassa alhaisemmasta tarkkuudesta ja vaaditusta jälkikäsittelystä. Suorakerrostuksella on kuitenkin pitkä historia korjaussovelluksissa. (Duda yms. 2016)

## **4.3 Teknologiat metallin 3D-tulostamiselle**

Ainetta lisäävässä valmistuksessa on kehitetty useita tekniikoita. Jauhepetisulatus on johtava tekniikka ja myös merkityksellisin metalli esineiden valmistukseen, kuten alla olevasta kuvasta 12 ilmenee. (Berger 2013)

## Additive manufacturing technologies

TECHNOLOGY	MATERIALS	TYPICAL MARKETS	RELEVANCE FOR METAL
 <b>Powder bed fusion</b> – Thermal energy selectively fuses regions of a powder bed	Metals, polymers	Prototyping, direct part	●
 <b>Directed energy deposition</b> – Focused thermal energy is used to fuse materials by melting as the material is deposited	Metals	Direct part, repair	◐
 <b>Sheet lamination</b> – Sheets of material are bonded to form an object	Metals, paper	Prototyping, direct part	◑
 <b>Binder jetting</b> – Liquid bonding agent is selectively deposited to join powder material	Metals, polymers, foundry sand	Prototyping, direct part, casting molds	◑
 <b>Material jetting</b> – Droplets of build material are selectively deposited	Polymers, waxes	Prototyping, casting patterns	○
 <b>Material extrusion</b> – Material are selectively dispensed through a nozzle or orifice	Polymers	Prototyping	○
 <b>Vat photopolymerization</b> – Liquid photopolymer in a vat is selectively cured by light-activated polymerization	Photopolymers	Prototyping	○

Kuva 12. Ainetta lisäävät valmistustekniikat (mukaillen Berger 2013)

Suora metallinlasersintraus on edullisin jauhepetisulatustekniikka ottaen huomioon lyhyen valmistusajan, kustannustehokkaan kokoonpanon ja laajan valikoiman metalliosia kuten kuvassa 13. Monimutkaiset geometriat ja kokoonpanot voidaan yksinkertaistaa ja näin saavuttaa kustannustehokas kokoonpano. Suora metallinlasersintraus ei vaadi erityisiä työkaluja, kuten valut, joten se on kätevä lyhyille tuotantosarjoille. On huomattava, että selektiivistä lasersintrausta/-sulatusta ja suoraa metallinlasersintrausta käytetään usein yhdessä kuvaamaan samaa perustekniikkaa. (Duda yms. 2016)

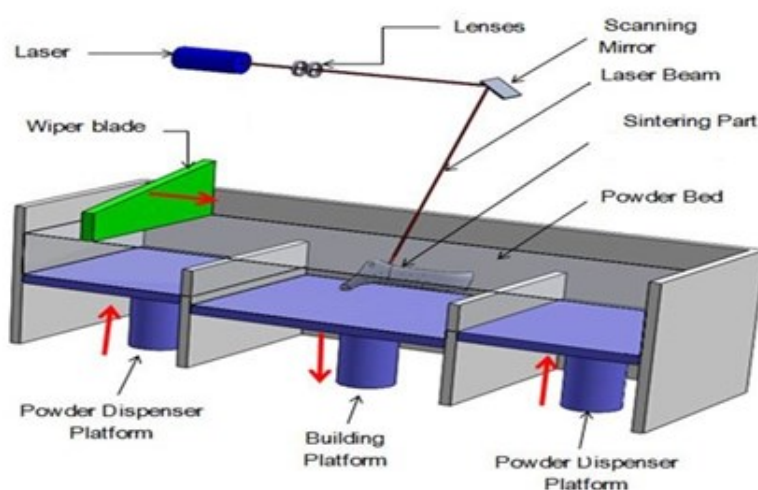
Type	Technology	Materials
Powder Bed	Powder bed and inkjet 3D printing (3DP)	Almost an metal alloy, powdered polymers
	Electron beam melting (EBM)	Almos an metal alloy including titanium alloys
	Selective laser melting (SLM)	Titanium alloys, superalloys, stainless steel, aluminium
	Selective heat sintering (SHS)	Thermoplastic powder
	Selective laser sintering (SLS)	Thermoplastic powder, metal powder, ceramic powder
	Direct metal laser sintering (DMLS)	Almost and metal alloy

Kuva 13. Jauhepetisulatustekniikat (mukaillen Duda yms. 2016)

### 4.4 Suora metallinlasersintraus

Suora metallinlaserisintraus on laserpohjainen nopea prototyyppien valmistus, jonka avulla osat valmistetaan yhdellä prosessilla. Monimutkaisia osia voidaan tuottaa suoraan tietokonepohjaisista kolmiulotteisista malleista jähmettämällä metallijauhekerrokset

kerroskohtaisesti, jotka vastaavat kyseisen kerroksen kolmiulotteisen osan poikkileikkausta. Seuraava kuva 14 esittää suoria metallinlaserisintrausprosessissa käytettyjä peruskomponentteja. Suoran metallinlaserisintraustekniikan peruseriaate on sulattaa ohuita metallijauhekerroksia sähköisesti ohjatulla lasersäteellä. Suoran metallinlaserisintrauskoneen tärkeitä osia ovat: rakennusaluusta, annosteluyksikkö, päällystysyksikkö, laserjärjestelmä, tarkkuusoptiikka, nopea skanneri ja tietokone prosessiohjelmistoinen. Metallijauhetta varastoidaan annosteluyksikköön ja uusi kerros levitetään tasaisesti teräspohjalevyille. On huomattava, että selektiivinen lasersintraus/-sulatus ja suora metallinlasersintraus kuvaavat periaatteessa samaa prosessia, tärkein ero on jauheen laatu. (Duda yms. 2016)



Kuva. 14 Suora metallinlaserisintrauslaitteen komponentit (mukaillen Monaheng yms. 2018)

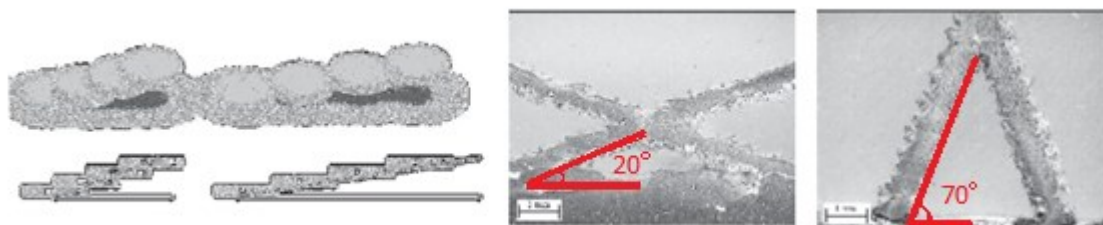
#### 4.5 Solumaisten rakenteiden tulostustekniikan ja suunnittelun rajat

Ainetta lisäävää valmistusta sovellettaessa muuttuvat useat reunaehdot perinteiseen suunnitteluun ja prosesseihin verrattuna. Alla luetellaan tärkeimmät asiat, jotka on otettava huomioon ainetta lisäävän valmistuksen suunnittelussa. (Duda yms. 2016)

Yleisesti ottaen kevyiden rakenteiden valmistettavuudesta ymmärretään vähän, vaikka on todettu, että sellaisilla tekijöillä kuin energian tiheys, säteen teho, skannausnopeus, osan sijainti, osan suunta ja skannausstrategiat ovat kaikki mahdollisesti merkittävästi vaikuttavia solurakenteiden mekaanisiin ominaisuuksiin. Portaikkovaikutus on yleensä merkittävämpi solurakenteissa geometrioiden pienten mittojen takia. Tukien

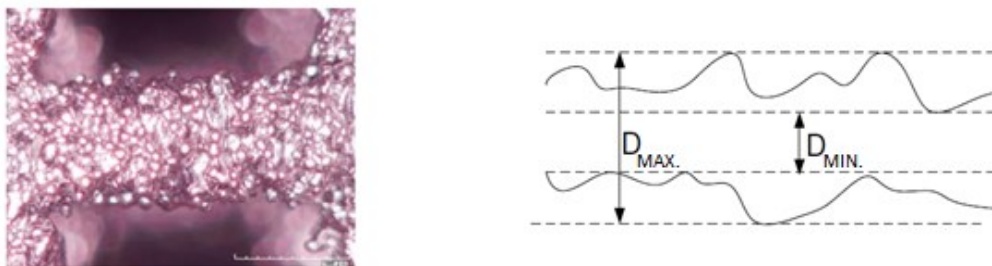


portaikkovaikutus voisi parantua, kun tuet olisivat enemmän linjassa vaakasuoraan tasoon nähden, kuten kuvassa 15 esitetty. Poikkileikkausgeometria osoittaa merkittävän eron 20 asteen kulman tuloksilla verrattuna 70 asteen kulman tukiosiin. Lasersulatusprosessilla on kuitenkin helpompi valmistaa ohuita tankoja pienemmällä kulmalla, koska niiden poikkileikkauspinta-ala on suurempi. (Yang yms 2016)



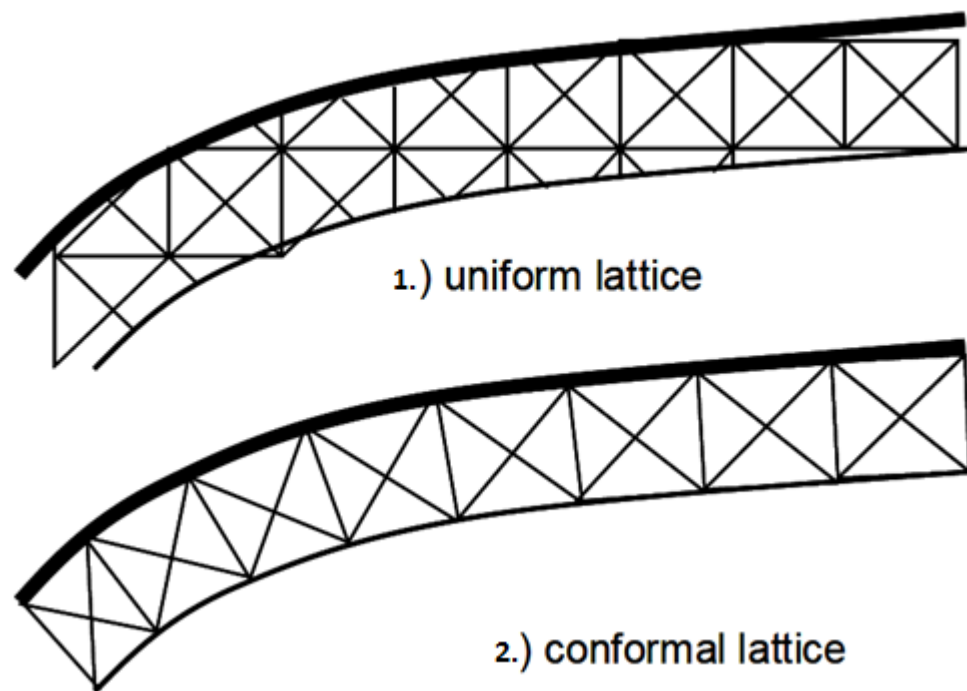
Kuva 15. Portaikkovaikutus solurakenteisiin (mukaillen Yang yms 2016)

Jauhepetimenetelmässä geometrinen virhe voi aiheutua, kun prosessoidulta jauhepinnalta lämpö poistuu. Kuten kuvassa 16 esitetään, nämä pintaviat aiheuttavat mittavaihteluita solurakenteissa. Mekaanisten ominaisuuksien laskemiseksi tulisi mallinnuksessa käyttää tukijalan vähimmäismittaa  $D_{min}$ , joka on esitetty kuvassa 16. Toisaalta huokoskoon laskemiseksi tulisi todennäköisesti käyttää suurinta tukijalkaa  $D_{max}$ , joka on esitetty kuvassa 16. Suuremmissa rakenteissa tällainen pinnan karheus voisi mahdollisesti vähentää väsymiskykyä, ja solurakenteissa tämä ongelma voisi olla selvempi näiden rakenteiden suurten ominaispinta-alojen vuoksi. Monimutkaisten geometrioiden ja laajojen sisäisten piirteiden vuoksi solurakenteille on yleensä vaikea suorittaa pintakäsittelyä. Tämän seurauksena metallisten solurakenteiden väsymiskyky on edelleen merkittävä este niiden rakenteellisille sovelluksille. Geometrinen virheiden takia solurakenteiden todelliset mitat poikkeavat usein huomattavasti malleista, etenkin kun mitat pienenevät. (Yang yms 2016)



Kuva 16. Pinnanlaatuongelma ohuilla rakenteilla (mukaillen Yang yms 2016)

Perusidea, miten ristikkorakenne luodaan, esitetään tässä. Nämä rakennetyypit on esitetty kaksiulotteisesti yksinkertaisuuden vuoksi. Kennorakenteet koostuvat sarjasta tukia, jotka yhdistyvät kennon solmuihin. Ristikkorakenteen luomiseksi kaksiulotteisesti, rakennetyypit on kartoitettava verkkoon. Kaksiulotteisessa muodossa verkko koostuu joukosta kytkettyjä nelikulmioita. Kolmiulotteisessa muodossa verkko koostuu heksaedreistä. Muokkautuvien ja yhdenmukaisten rakenteiden välistä eroa havainnollistetaan kuvassa 17, jossa (1) on esimerkki yhdenmukaisesta kennorakenteesta ja (2) esittää muokkautuvaa kennorakennetta. Yhdenmukaisten rakenteiden verkot koostuvat kuutioelementeistä kolmiulotteisessa, kun taas muokkautuvassa rakenteissa verkkoelementit ovat yleisesti heksaedreja. (Nguyen ym. 2012)



Kuva 17. Yhdenmukainen ja mukautuva ristikkorakenne (mukaillen Nguyen ym. 2012)

Muokkautuvan ja yhdenmukaisen kennorakenteen suorituskykyä voidaan vertailla. Tulos osoittaa, että muokkautuvalla kennorakenteella voi olla parempi lujuus kuin yhdenmukaisella kennorakenteella, koska yksikkökennnot orientoidaan uudelleen ulkoisten kuormitusten mukaan. (Tang yms 2015)

## 4.6 3D-tulostuksen hyödyt ja haitat

Ainetta lisäävän valmistuksen kustannukset ovat melko korkeat, lähinnä erittäin hitaan tulostusajan vuoksi. Tyypillisimmät tulostusaikaan vaikuttavat tekijät ovat: laserin skannausnopeus, laserin teho, kerroksien paksuus, pohjalevyn esilämmityskyky ja useiden lasereiden päällekkäisyysalue. Lisäksi kokonaisen järjestelmän tuottavuuteen vaikuttaa jauheen käsittely ja vaihto yhdessä osan puhdistuksen kanssa jäljellä olevan jauheen poistamiseksi. (Duda yms. 2016)

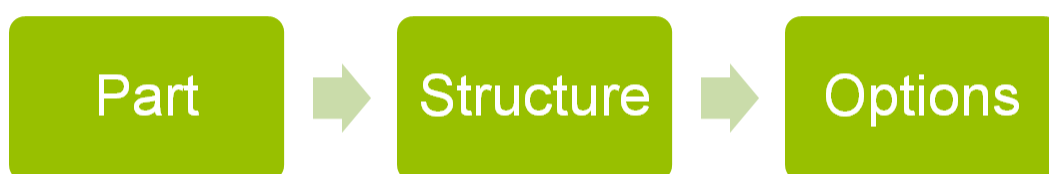
Ainetta lisäävän valmistuksen etuja ovat kustannuksien pieneneminen, haastava geometria ei lisää kustannuksia, prototyyppien valmistus ilman työkaluja tai muottia, suunnittelun ja tuotekehityksen nopeutuminen. (Kontio 2017) Hyödyntämällä monimutkaista rakennetta olisi mahdollista keksiä uusia malleja, jotka olisivat huomattavasti kevyempiä kuin nykyiset mallit. Nykyiset haitat taas ovat: hidas rakennusnopeus, rajoitettu kappaleen koko (rajoitettu tulostimen koon perusteella), oikeiden prosessiparametrien löytäminen ja mittatarkkuus. Vaadittuihin jälkikäsittelymenetelmiin vaaditaan huomattavia ponnisteluja kuten pinnan viimeistely sekä käytetyn jauheen laatu. (Berger 2013).

## 5 SUUNNITTELUMENETELMÄT

Suunnittelussa keskitytään kolmeen erilaiseen suunnittelumenetelmään. Suunnittelumenetelmät valitaan niiden monipuolisuuden ja helppokäyttöisyyden kannalta. Metso Flow Controllilla oli ANSYS-lisenssit ja siksi kyseistä ohjelmaa halutaan hyödyntää ja samalla oppia sen antamista mahdollisuuksista. Ohjelma tarjoaa monipuolisen kirjaston ristikkorakenteita ja niiden käyttö erilaisissa simuloinneissa on erinomaisen helppoa. Ensimmäinen vaihtoehto suunnitteluun ristikkorakenteista on ANSYS SpaceClaim, jossa voidaan kiinteeseen kappaleeseen lisätä eri ristikkorakenteita. Toisena vaihtoehtona käydään läpi ANSYS Material designer, jossa voidaan yhden kennorakenteen avulla määrittää materiaalimalli. Materiaalimalli voidaan sisällyttää kiinteeseen kappaleeseen, jonka ansiosta saadaan ristikkorakenteen ominaisuudet. Kolmantena suunnitteluprosessina on ristikkorakenteen optimointi. Työssä myös suunnitellaan koekappaleita, joita tullaan testaamaan simuloimalla ja käytännön kokeella.

### 5.1 Ristikkorakenteen lisääminen kiinteään rakenteeseen

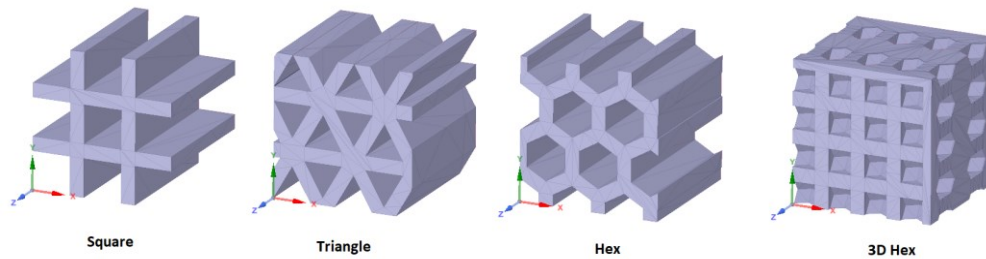
Kuvassa 18 on esitetty suunnitteluprosessi ristikkorakenteen luomiseen kiinteään rakenteeseen ANSYS Release 19.2-ohjelmalla.



Kuva 18. Suunnitteluprosessi ristikkorakenteen lisäämiseen kiinteään kappaleeseen.

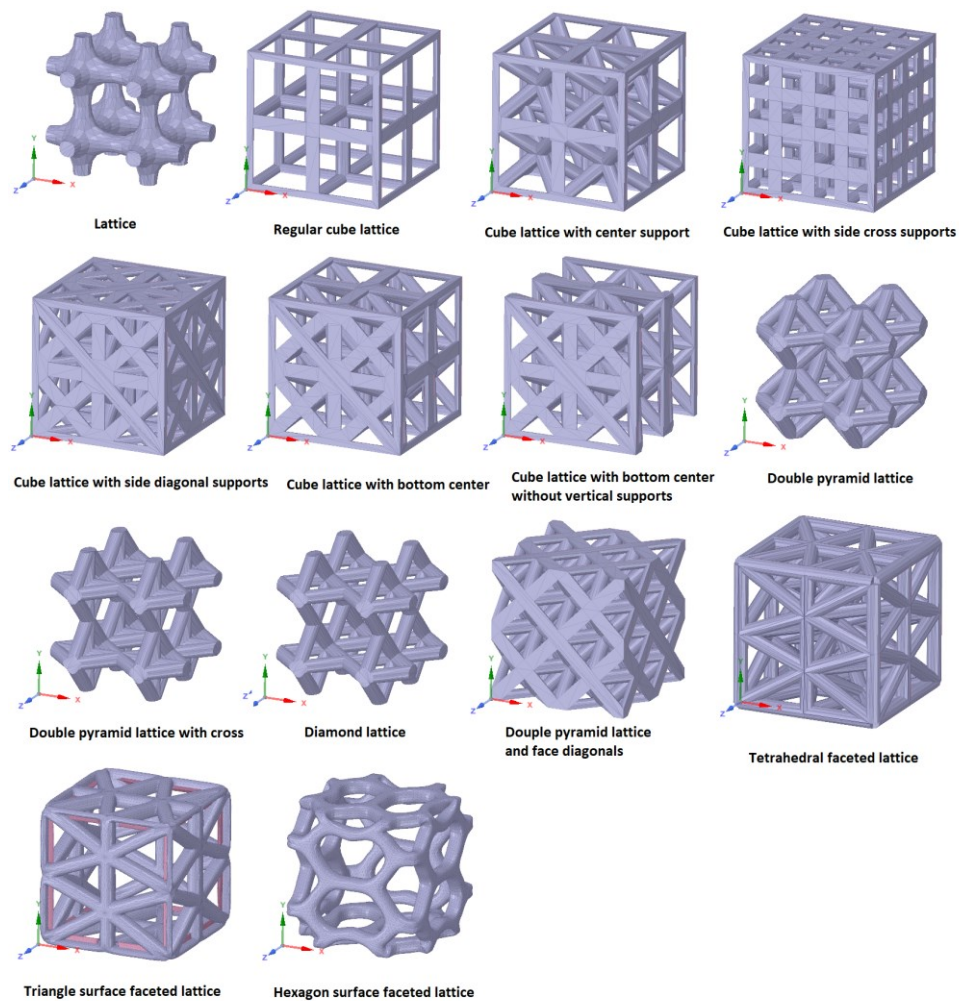
ANSYS SpaceClaim-ohjelmalla voidaan tuoda tai vaihtoehtoisesti tehdä osa. Osaan voidaan lisätä erilaisia ristikkorakenteita ja niiden eri ominaisuuksiin pystytään monipuolisesti vaikuttamaan. Tärkein ominaisuus tämän työn kannalta on rakenteen valinta. Valittavana ovat kaksiulotteiset rakenteet, kolmiulotteiset rakenteet ja oman rakenteen luominen. Kuvassa 19 on esitetty kaksiulotteiset rakenteet, jotka löytyvät

valmiina ohjelman kirjastosta. Eli kolmio, neliö ja kuusikulmio sekä vähän erikoisempi kuusikulmio.



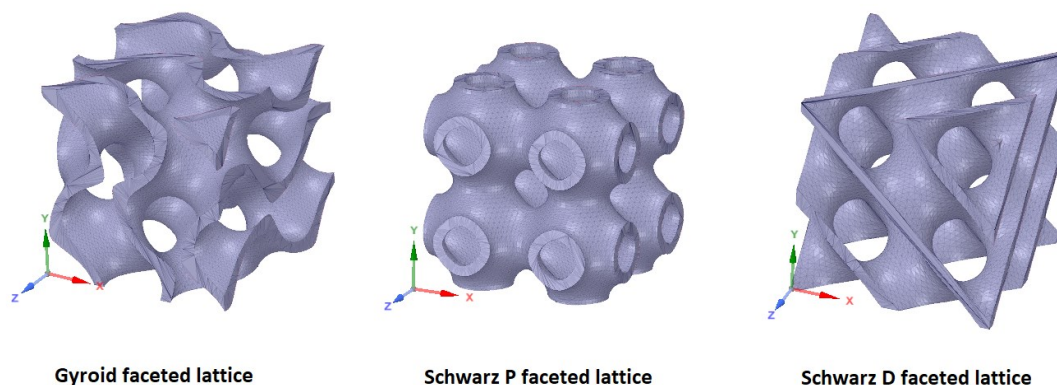
Kuva 19. Kaksiulotteiset rakenteet ANSYS-kirjastosta.

Kolmiulotteisissa rakenteissa kirjaston koko on paljon suurempi kuin kaksiulotteisissa. Kirjastossa on yhteensä 14 eri ristikkorakennetta, joiden käyttöelementtinä toimii kuutio. Kuvassa 20 on esitetty valittavat ristikkorakenteet.



Kuva 20. Kolmiulotteiset rakenteet ANSYS-kirjastosta

Kolmiulotteisissa rakenteissa on myös mahdollista valita minimaallisia pintarakenteita. Kuvassa 21 on kirjastosta löytyvät minimaaliset pintarakenteet, jotka ovat yleisimmin käytettyjä.



Kuva 21. Minimaaliset pintarakenteet ANSYS-kirjastosta.

Oman rakenteen luominen on myös mahdollista, jos kirjastosta ei löydy haluttua rakennetta. Oman rakenteen luominen mahdollistaa uusien ominaisuuksien luomisen rakenteen avulla. Kun haluttu rakenne on valittu tai luotu, sitä pystytään muokkaamaan suunnittelutavoitteiden täyttämiseksi. Kennorakenteen kokoa, tiheyttä ja sauvojen tai seinämän paksuutta voidaan vaihdella, jolla saadaan muokattua helposti koko rakennetta halutuksi. Lopuksi valitaan kappale mihin halutaan lisätä kyseinen rakenne ja tarvittaessa voidaan poistaa halutut seinämät, jotta vältetään umpinainen rakenne. Valitettavasti ANSYS Release 19.2-ohjelmassa ei ole muokkautuvaa verkkoa, jonka avulla rakenne saataisiin monimutkaisiin kappaleisiin paremmin sovitettua. Eli ainoana vaihtoehtona on yhdenmukainen verkotus.

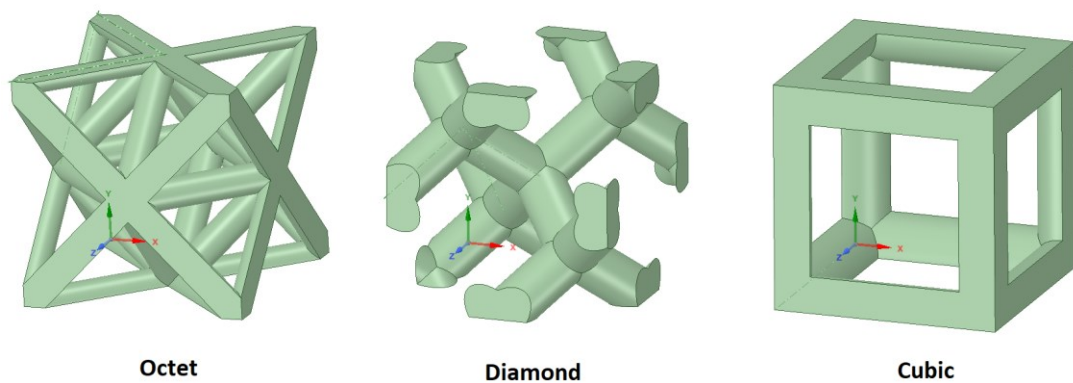
## 5.2 Ristikkorakenteen sisällyttäminen materiaalimallina

Material designer:ssä voidaan luoda monia erilaisia materiaaleja ja sen etuna on halutun rakenteen sisällyttäminen kiinteään rakenteeseen materiaalimallina. Tämä auttaa verkotuksen ja tiedostokoon pysymiseen maltillisena. Materiaalien tekeminen tapahtuu kuvan 22 mukaan siten, että aluksi valitaan haluttu rakenne. Rakenteita on valittavana ristikko, erilaiset komposiitit ja itse tehty. Tässä työssä keskitytään ristikkorakenteeseen.



Kuva 22. Materiaalimallin suunnitteluprosessi

Ristikkorakenteen valinnan jälkeen pääsee valitsemaan materiaalin. Materiaalin valitsemisen jälkeen pääsee valitsemaan ristikkorakenteita. Rakenteita on tällä hetkellä kuvan 23. mukaisesti kolme ja oman rakenteen teko on myös mahdollinen. Yksikkökennon kokoa voidaan muokata halutuksi ja sauvojen paksuuden voi myös itse päättää.



Kuva 23. ANSYS Material designer ristikkorakenteiden kirjasto.

Haluttu rakenne tulee seuraavaksi verkottaa, jotta sen ominaisuudet saadaan määritetyksi. Verkotusmahdollisuuksia on useita, jotta varmasti kaikenlaisiin rakenteisiin saadaan sopiva verkotus. Materiaalimalliin voidaan myös lisätä haluttuja ominaisuuksia. Lisättävät ominaisuudet ovat laskennallinen lineaarinen joustavuus, lämpölaajenemiskerroin, lämmönjohtavuus sekä geometriarajoitukset. Lopuksi kun kaikki halutut valinnat on saatu tehtyä, lasketaan materiaalimalli ja lisätään se materiaalina haluttuun kappaleeseen.



### 5.3 Ristikkorakenteen optimointi

Optimoinnin tarkoituksena on jakaa materiaali niin, että se antaa kappaleelle optimaalisen jäykkyyden määritetyllä suunnittelutilalla ja yhden tai useamman kuormituksen tapauksessa. Ristikkorakenteen optimoinnissa käytetään samaa periaatetta, mutta suunnittelutilassa käytetään ainoastaan valittua ristikkorakennetta. Ristikkorakenteen optimointiprosessi on kuvattu kuvassa 24.



Kuva 24. Ristikkorakenteen optimoinnin suunnitteluprosessi.

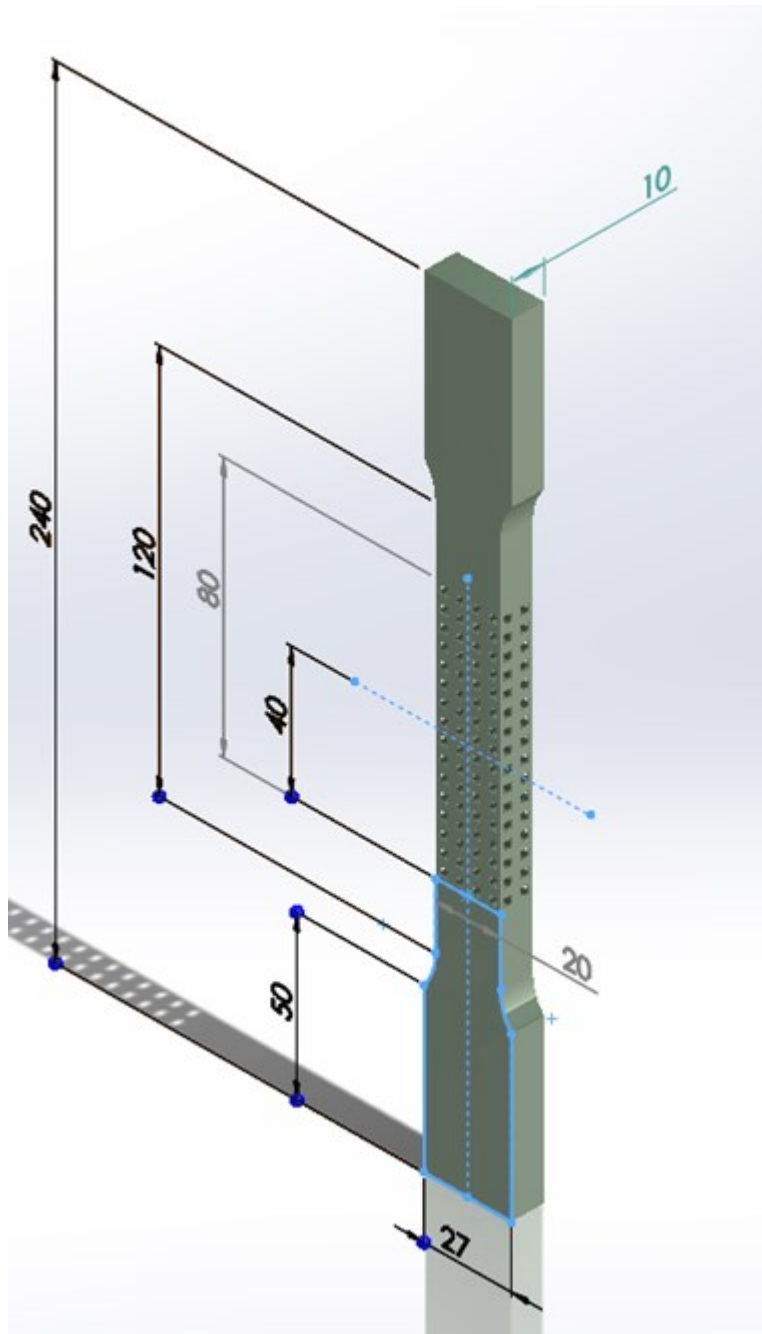
Optimoinnin suunnittelu alkaa geometrian lisäämisellä. Simulointimalliin lisätään kuormittavat voimat ja tuennat, joiden ansiosta saadaan staattinen analyysi aikaiseksi. Tulosten perusteella päästään optimoimaan kappaletta. Tärkeimpiä asetuksia ovat sauvan minimi- ja maksimitiheyksien valinta. Yksikkökennon koko on myös yksi tärkeimmistä valinnoista. Laskenta-aika kasvaa valtavan suureksi, jos yksikkökennon kokoa ei ole määritetty. Optimoitaviksi määreiksi voidaan valita jäykkyyden maksimointi, massan tai tilavuuden minimointi. Simuloinnin valmistuttua optimoidun geometrian näkee vasta kun siirtyy tulosten perusteella tehtyyn malliin. Malliin joutuu erikseen lisäämään ristikkorakenteen ANSYS SpaceClaim-ohjelmalla.

### 5.4 Koekappaleen suunnittelu

Koekappaleet suunniteltiin standardin SFS 3475 mukaan. Suunnittelussa on huomioitava ristikkorakenteen sijoittelu ja valmistettavuus. Rakenne halutaan menevän poikki mitattavalta alueelta eli sauvan keskikohdasta. Valmistuksen reunaehtoihin kuuluu 3D-tulostusalustan koko ja tulostuskorkeus, jotka rajaavat kappaleen kokonaiskoon. Pulveri pitää olla myös poistettavissa ristikkorakenteiden sisältä, joten suljettua tai liian tiheää rakennetta ei voi tehdä. Tarkoituksena on tutkia ristikkorakenteen käyttäytymistä vetokokeen avulla sekä simuloimalla että käytännössä.

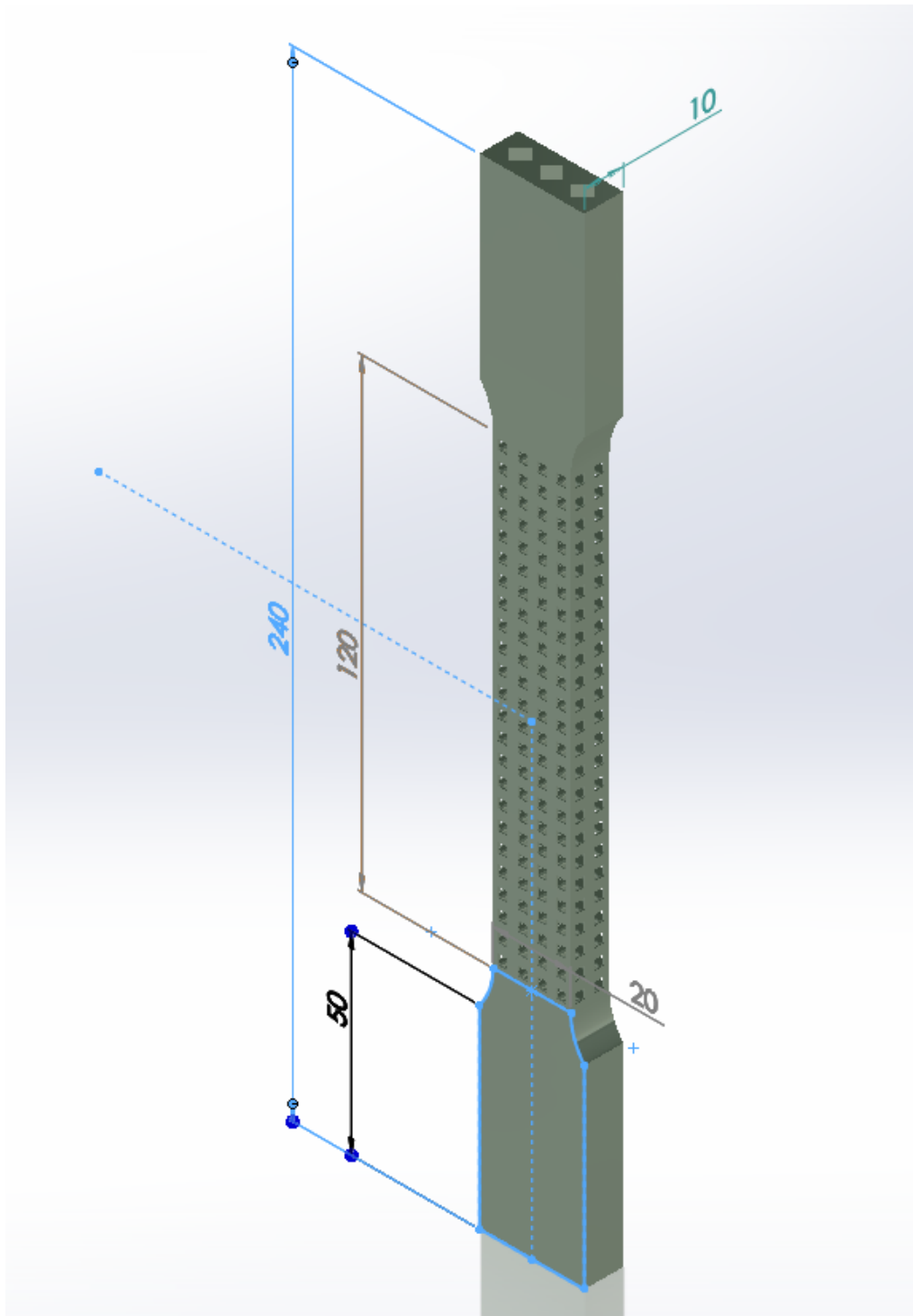


Selvitettävänä on eri ristikkorakenteiden käyttötarkoitus, ominaispaino ja lujuusominaisuudet. Ensimmäisessä koekappaleessa ajatuksena oli, ettei ristikkorakennetta tarvitse sisällyttää koko sauvarakenteeseen, vaan se olisi sijoitettu sauvan keskelle. Rakenteen pituudeksi valittiin aluksi 80mm, jotta se on helposti mitattavissa kuroutuessa. Kuvassa 25 on esitetty ensimmäisen vetosauvan päämitat ja ristikkorakenteen sijoituspaikka.



Kuva 25. Vetosauvan päämitat ja ristikkorakenteen sijoitus.

Vetosauvojen toisessa versiossa pyrittiin nopeuttamaan tulostusta ja samalla vähentämään käytettävää materiaalia ensimmäiseen versioon nähden. Tämän ansiosta kustannuksetkin pienenevät. Tulostusnopeutta ja materiaalisäästöjä saatiin aikaiseksi, kun ristikkorakenteen pituutta kasvatettiin 120 millimetriä. Neliömäiset reiät kappaleen päihin auttoivat myös nopeuttamaan prosessia ja säästämään materiaalia. Kuvassa 26. on esitetty valmis rakenne ja päämitat.



Kuva 26. Valmiin vetosauvan päämitat ja ristikkorakenteen sijoitus.

## 6 RISTIKKORAKENTEIDEN TESTAUS

Työssä oli tavoitteena tehdä vetokoe ristikkorakenteilla ja tästä johtuen haluttiin selvittää eri ristikkorakenteiden ominaisuuksia. Vertailu tehdään kuormittamalla pieniä ristikkorakenteita samalla voimalla ja tarkastellaan saatuja tuloksia. Materiaalimallina sisällytettyä ristikkorakennetta verrataan geometrisesti tuotettuun ristikkorakenteeseen. Ristikkorakenteen optimoinnilla pyrittiin saamaan tietylle kuormitustapaukselle kevyin rakenne. Valitut ristikkorakenteet lisätään koekappaleisiin ja ne simuloidaan, jotta niitä voidaan sitten verrata käytännön kokeesta saatuihin tuloksiin.

### 6.1 Ristikkorakenteiden vertailu

ANSYS Release 19.2-ohjelmalla suoritettiin ristikkorakenteiden vertailu, johon oli valittu 10 eri ristikkoristikkorakennetta ja kaksiulotteisesta rakenteesta myös kuusikulmiorakenne. Simulointi suoritettiin staattisella analyysillä, koska ei ollut tarpeellista tutkia plastista käyttäytymistä. Tarkoituksena ei myöskään ollut löytää rakenteiden myötörajaa, vaan verrata samalla asetuksilla saatuja tuloksia. Yksikkökennon kooksi valittiin kaikille 5mm ja sauvojen vahvuudeksi 1,2 mm. Ala- ja ylätasot jätettiin kiinteiksi rakenteiksi. Koko rakenteen kooksi tuli 10x10x10 mm, jotta laskennan aikaa saatiin pienemmäksi. Kaikkia valittuja rakenteita kuormitettiin samalla tavalla niin, että alataso oli jäykästi tuettu ja ylätasoon kohdistettiin 500 N vetävä voima.

### 6.2 Geometrisen ristikkorakenteen vertailu materiaalimalliin

Materiaalimallin tarkastelu tehdään vertailemalla kappaletta vastaavaan geometriseen malliin. Kappaleet ovat mitoiltaan 10x10x10. Kappaleisiin vaikuttavat samat voimat simuloinnissa, eli toinen pää tuentaan jäykästi ja toiseen päähän tulee 1000 N vetävä voima. Kumpaankin kappaleeseen valittiin cube-ristikkorakenne, joka löytyi valmiina sekä geometrisesta mallinnuksesta että materiaalimallista. Rakenteeseen valittiin yksikkökennon kooksi 10 mm .

### 6.3 Ristikkorakenteen optimoinnin simulointi

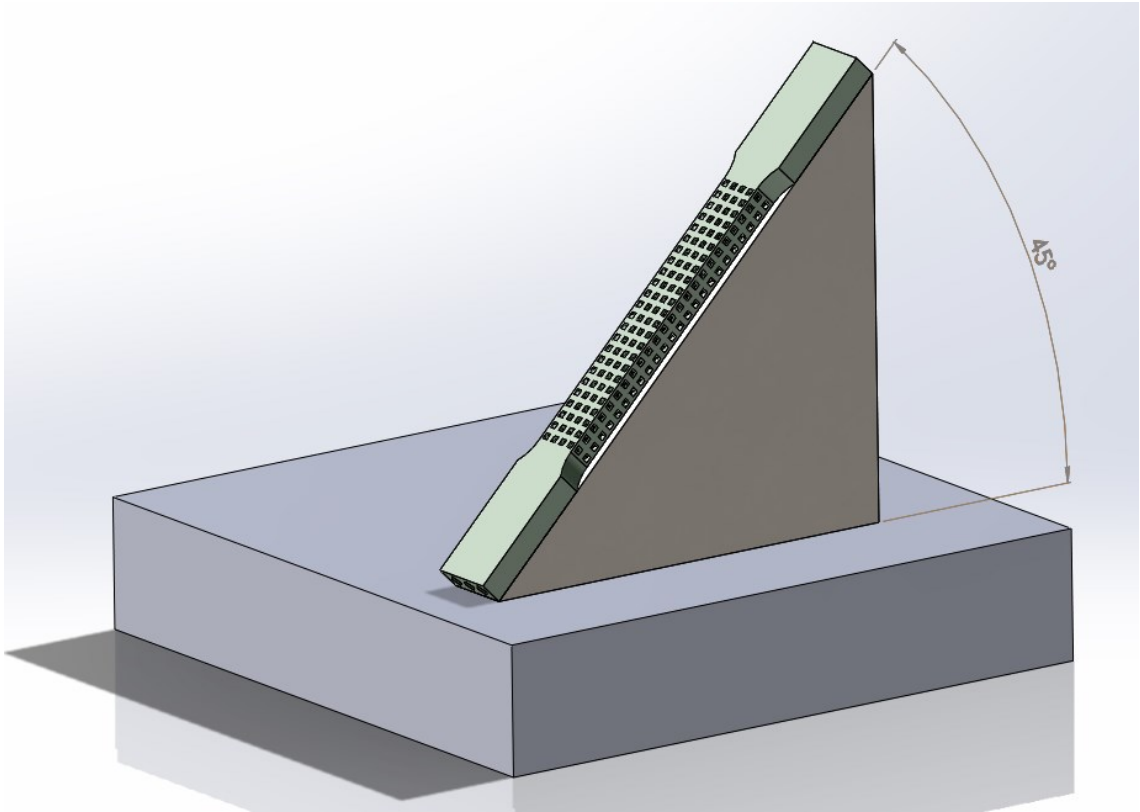
Ristikkorakenteen optimoinnissa kappaleen geometrian kooksi valittiin 20x10x120. Kyseinen kappale tuettiin jäykästi toisesta päästä ja toiseen päähän vaikutti 1000 N vetävä voima. Asetuksista sauvojen tiheyksien vaihteluväliksi tuli 0.5-1. Yksikkökennon kooksi valitaan 5 mm.

### 6.4 Vetosauvojen simulointi

Saatujen tulosten ja mielenkiinnon perusteella valitut ristikkorakenteet lisättiin vetosauvoihin. Valituiksi rakenteiksi tulivat regular cube lattice, hex ja double pyramid lattice and face diagonals. Kaksiulotteisen hex-yksikkökennon kooksi valittiin 2 mm . Simulointi suoritettiin kokonaiselle rakenteelle, koska laskennan keston kannalta siihen ei nähty esteitä. Regular cube lattice sai yksikkökennon kooksi 5 mm ja sauvojen vahvuudeksi valittiin 1,2mm. Simulointi koko rakenteelle olisi vienyt liikaa aikaa, joten hyödynnetään symmetriaa. Kappaleen päästä katsottuna symmetriaa hyödynnettiin niin, että kappaleeseen jäi neljä täyttä riviä yksikkökennoja. Viimeisenä rakenteena oli double pyramid lattice and face diagonals, jonka yksikkökennon kooksi tuli myös 5 mm. Poikkeuksena edelliseen sauvojen paksuudeksi valittiin 1 mm . Simuloinnissa hyödynnetään vieläkin enemmän symmetriaa, jotta laskenta-aikaa saatiin pienemmäksi. Symmetriaa hyödynnettiin samalla tavalla kuin edellisessäkin simuloinnissa, mutta vielä pystysuuntaisella symmetrialla saatiin pienennettyä laskenta aikaa.

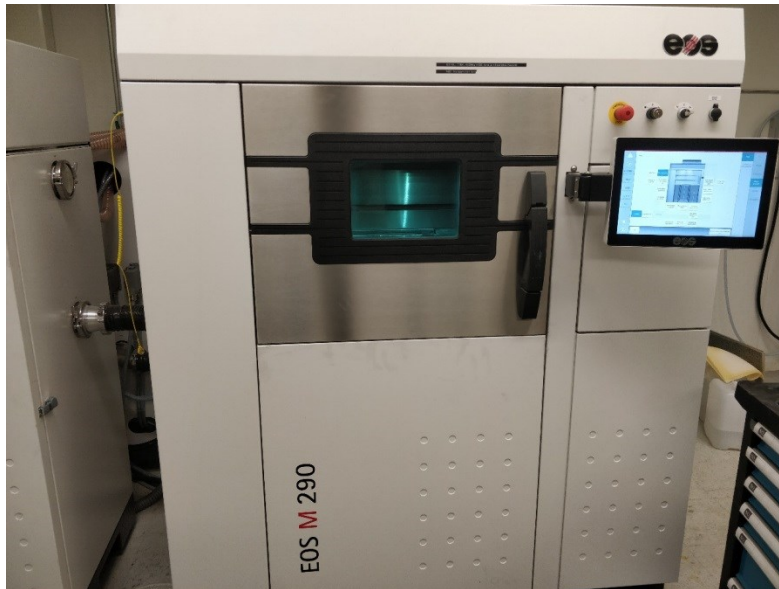
## 7 3D-TULOSTUS

3D-tulostaminen tehtiin alihankkijalla 3D Formtech:lla. Tulostettavat geometriat lähetettiin stl-muodossa, joka pienensi tiedoston kokoa. Alihankkija suunnitteli kappaleiden tulostusasennon ja tarvittavat tukimateriaalit. Kappaleet tulostettiin kuvan 27 mukaisessa asennossa 45 asteen kulmassa vaakatasoon nähden.



Kuva 27. 3D-tulostuksen asettelu.

Kun kappaleiden asennot ja paikat on suunniteltu, voitiin ne tulostaa kuvan 28 mukaisella EOS M 290-laitteistolla. Keskiarvotulostusnopeus oli 928,1 mm/s ja teho 214,2 W. Yksittäisen koekappaleen valmistukseen kului noin 18 tuntia. Kaikkien kappaleiden tulostuksen kokonaiskesto oli kuitenkin vain noin 61 tuntia, koska oli järkevää tulostaa useampi koekappale samassa tulostuksessa.



Kuva 28. Työssä käytetty 3D-tulostin.

Tulosteiden valmistumisen jälkeen alkoi jälkikäsittelyt. Ensimmäisenä vaiheena oli puhdistaa kappaleet jauheesta. Tämä kyseinen työvaihe suoritettiin sekä paineilmaa hyväksikäyttäen että metallikuulapuhalluksella. Toinen vaihe oli lämpökäsittely, jossa kappaleen lämpötila nostettiin 1030 asteiseksi ja pitoaika oli 60 minuuttia. Lämpökäsittelyn tarkoitus oli vain poistaa kappaleisiin tulleita jännityksiä. Kappaleet jäähdytettiin nopeasti alle 350 asteiseksi, ettei materiaaliin muodostu ei toivottuja rakenteita hilatasolla. Seuraavaksi kappaleet erotettiin alustasta kuvassa 29 näkyvällä sahalla.



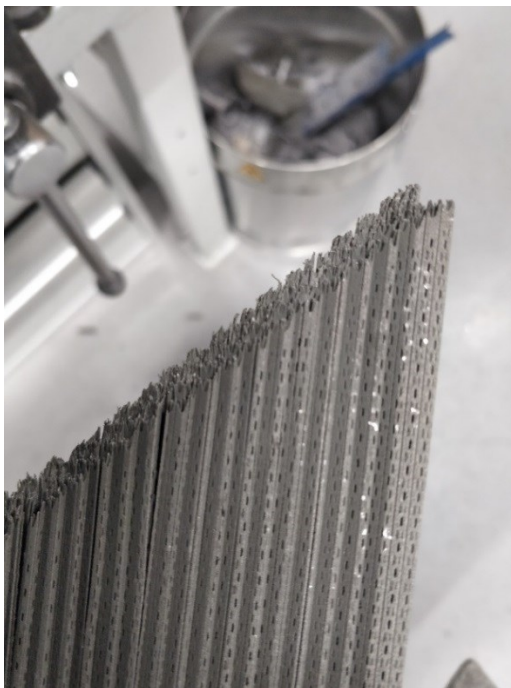
Kuva 29. Kappaleiden erotukseen käytetty saha.

Alustaan jää kappaleiden irrottamisen jälkeen tulostusmateriaalia, joka pitää poistaa uutta tulostusta varten. Kuvassa 30 näkyy tulostusalusta, joka on viimeistelty työstökoneella.



Kuva 30. Viimeistelty tulostusalusta.

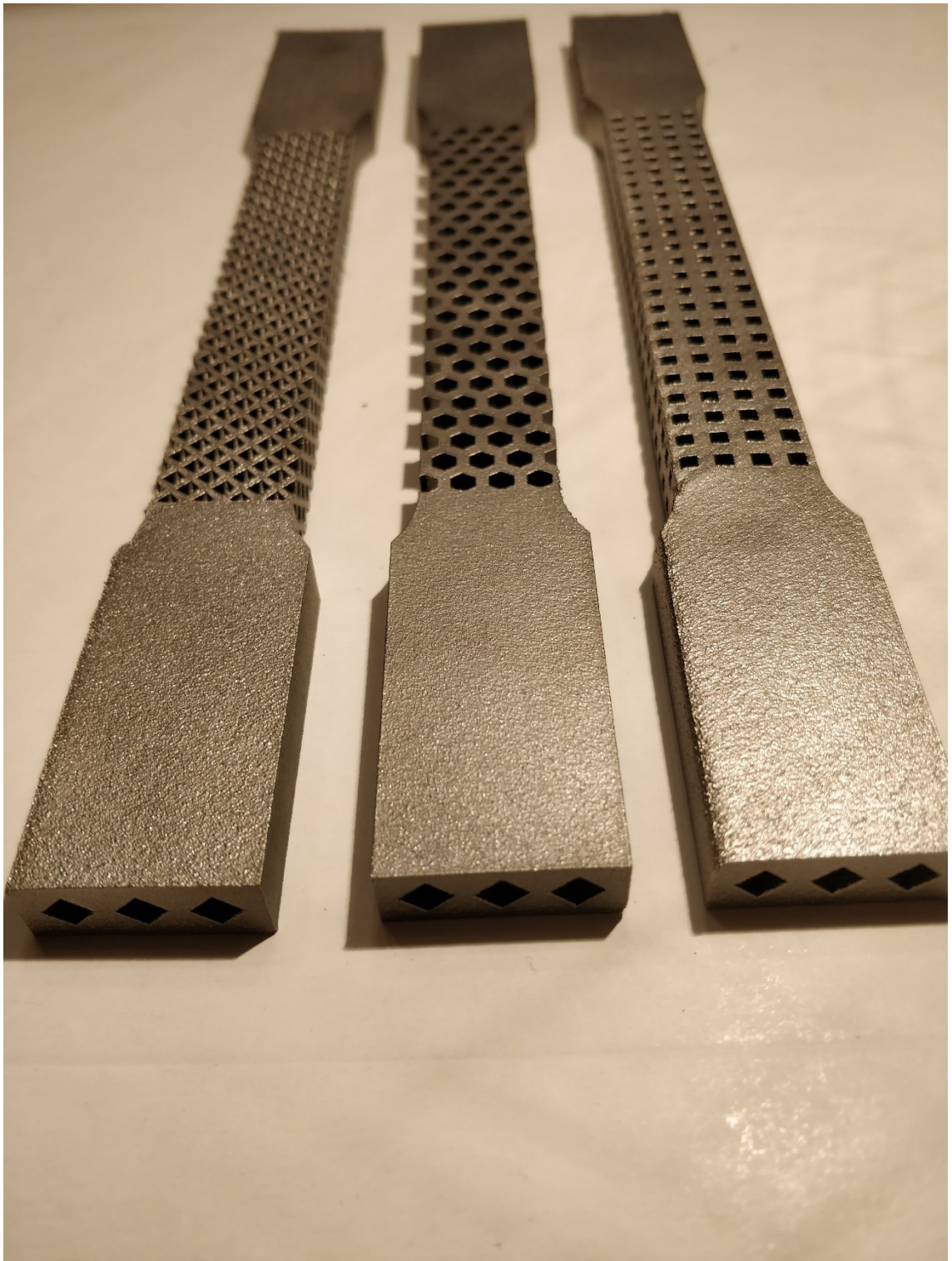
Loput tukirakenteet poistettiin erilaisilla käsityökaluilla. Tukirakenteet olivat hyvin heikon oloisia. Tämä johtui koneelle annetuista tukirakenteen tulostusarvoista. Tämän johdosta saatiin tulostusaikaa nopeutettua sekä kappaleen ja tukirakenteen irrottamista toisistaan helpotettua. Kuvassa 31 on esitetty irrotettu tukiranne.



Kuva 31. Kappaleen tukirakenne.



Lopuksi kappaleet olivat valmiita. Valmiit kappaleet ovat kuvassa 32.



Kuva 32. Valmiit kappaleet.



## 8 VETOKOE

Vetokoe suoritettiin Oulun yliopistolla. Vetokoelaitteena oli Zwick/Roell Z100, joka näkyy kuvassa 33. Koekappale yksi kerrallaan asetettiin laitteeseen, jossa puristavat sylinterit pitivät niitä paikallaan.



Kuva 33. Vetokoelaitteisto.

Ammattitaitoinen koneen käyttäjä asetti kappaleet kuvan 34 mukaisesti. Mittauksessa käytettiin koskettavia extrometrejä. Näiden tarkoitus on mitata mittavälin etäisyyden muutosta. Aloitus mittaväliä jouduttiin kesken mittausten vaihtamaan, jotta varmistettiin extrometrien kärkien kosketus kappaleeseen. Kappaleissa oli rakenteen takia reikiä, joihin ei haluttu kärkien menevän. Mittaus olisi vääristynyt, jos extrometrit olisivat päässeet liikkumaan mittauksen aikana.



Kuva 34. Kappaleen asettelu.

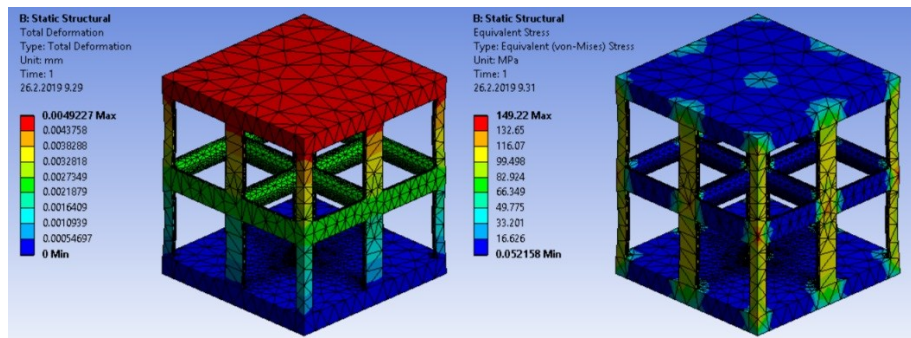
Huomioitavaa oli kappaleiden katkeaminen mitattavan alueen ulkopuolelta, joka tulee todennäköisesti vaikuttamaan saatuihin tuloksiin. Tulokset saatiin suoraan tietokoneelle, josta ne oli helppo ottaa tarkasteluun.

## 9 TULOKSET

Tulokset esitellään samassa järjestyksessä kuin ne on esitetty kappaleissa 6 ja 8.

### 9.1 Ristikkorakenteiden vertailun tulokset

Kuvassa 35 on esitetty tulokset cube-rakenteen simuloinnista. Muiden rakenteiden tulokset ovat liitteessä 2.



Kuva 35. Cube-rakenteen simuloinnin tulos.

Taulukossa 1 on esitetty simuloitujen kappaleiden tulokset, joita voidaan verrata keskenään. Taulukossa  $R_{MAX}$  on jännitys,  $\Delta l$  on pituuden muutos,  $F$  on käytetty voima,  $E$  on kimmomoduuli,  $q$  on tiheys,  $q/q^*$  on suhteellinen tiheys,  $A_{min}$  on pienin poikkileikkauksen pinta-ala ja  $V$  on tilavuus.

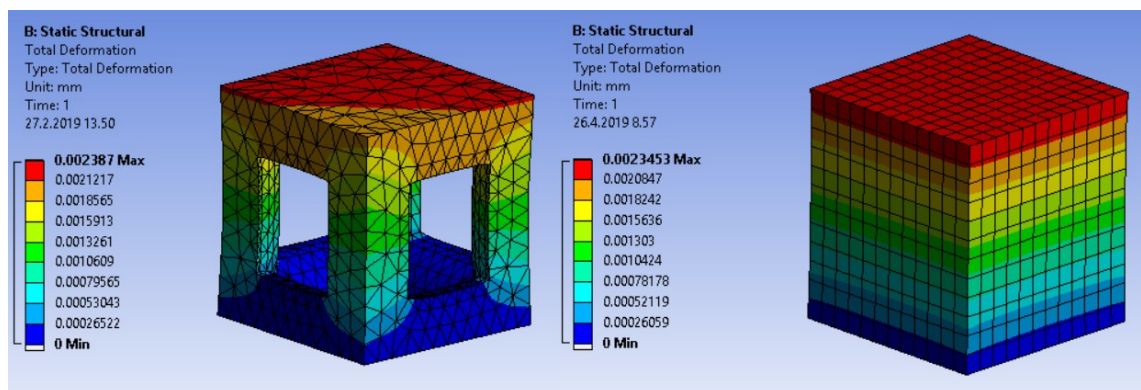


Taulukko 1. Ristikkorakenteiden tulokset

Rakenne	$R_{MAX}$	$\Delta l$	Yksikkö kennon koko	Palkkien koko	F	E	$\rho$	$\rho / \rho^*$	$A_{min}$	V
	MPa	mm	mm	mm	N	GPa	Kg/m <sup>3</sup>		mm <sup>2</sup>	mm <sup>3</sup>
Cube	149.22	0.004923	5	1.2	500	228.1606	0.892662	0.1144438	4.4517	114.4438
Cube bottom center	96.513	0.002061	5	1.2	500	156.2641	2.691601	0.3450771	15.5258	345.0771
Cube bottom center without sides	88.063	0.002096	5	1.2	500	53.6085	3.024998	0.3878202	44.4921	387.8202
Cube center support	90.604	0.002199	5	1.2	500	99.34717	3.100192	0.3974605	22.8839	397.4605
Cube side cross support	58.403	0.00166	5	1.2	500	41.94511	2.976744	0.3816338	71.7963	381.6338
Cube side diagonal support	62.957	0.001572	5	1.2	500	113.1828	3.565225	0.4570801	28.1002	457.0801
Diamond	279.23	0.007639	5	1.2	500	62.52962	1.629307	0.2088855	10.4683	208.8855
Double pyramid	148.11	0.003348	5	1.2	500	142.6578	2.183131	0.2798886	10.4683	279.8886
Double pyramid diagonal	54.363	0.000962	5	1.2	500	87.38411	4.432032	0.5682092	59.5011	568.2092
Double pyramid with cross	131.66	0.003347	5	1.2	500	142.7004	1.912561	0.2452001	10.4683	245.2001
Hex	39.651	0.001608	1.8	1	500	124.3704	3.402062	0.4361618	25	436.1618
Solid	10.07	0.000235			500	213.1196	7.8	1	100	1000

## 9.2 Geometrisen ristikkorakenteen ja materiaalimalliin vertailun tulokset

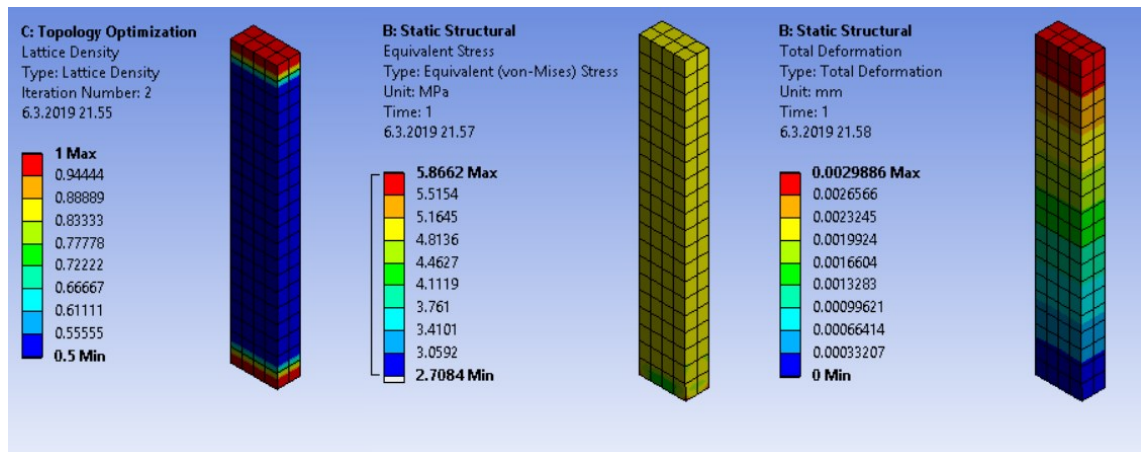
Geometrisen mallin ja materiaalimallin simuloinnin tulokset ovat kuvassa 36.



Kuva 36. Geometrisen mallin ja materiaalimallin tulokset.

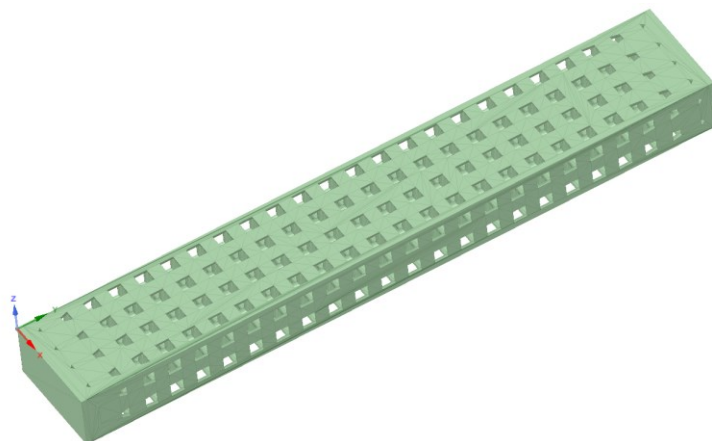
### 9.3 Optimoinnin tulokset

Optimoinnin simuloinnin tulokset ovat kuvassa 37. Vasemmanlaitimmaisessa on määritetty ristikkorakenteen palkkien vahvuus. Keskimmäisessä on esitetty jännitykset. Oikeanlaitimmaisessa on siirtymät.



Kuva 37. Optimoinnin tulokset

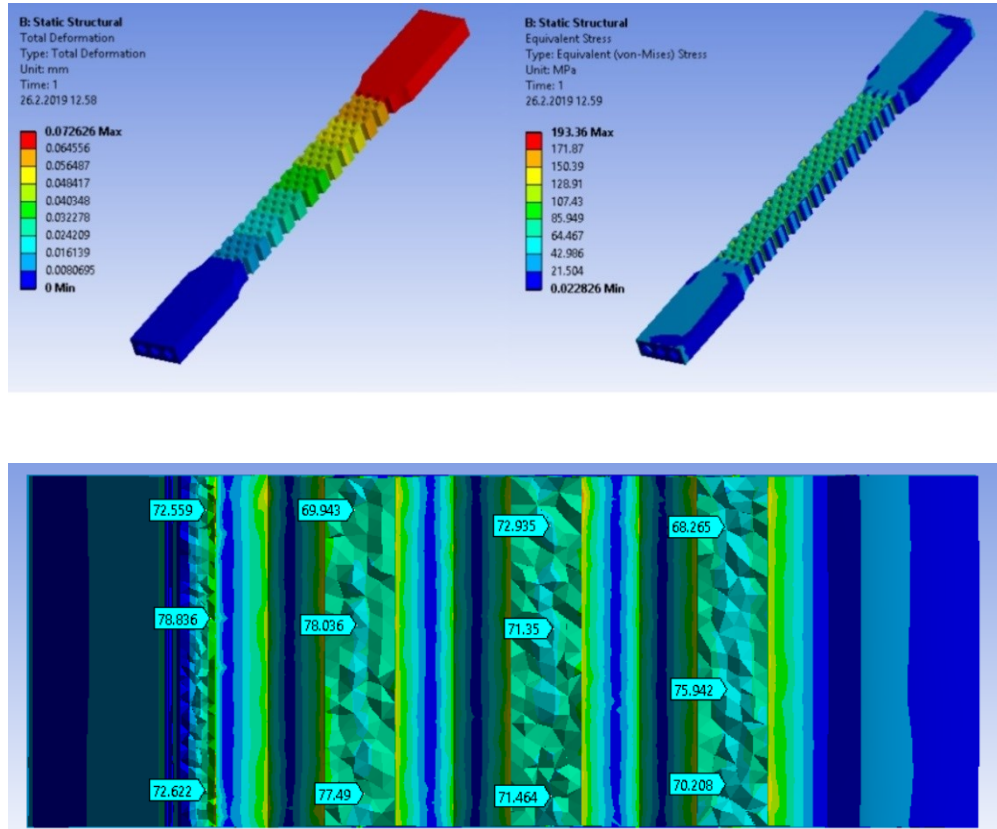
Optimoinnin tuloksena saatu geometria on kuvassa 38.



Kuva 38. Optimoitu malli

## 9.4 Simuloitujen vetokokeiden tulokset

Kuvassa 39 on esitetty tulokset hex-rakenteen vetokokeen simuloinnista. Muiden rakenteiden tulokset ovat liitteessä 3.



Kuva 39. Tulokset simuloidusta hex-koekappaleesta.

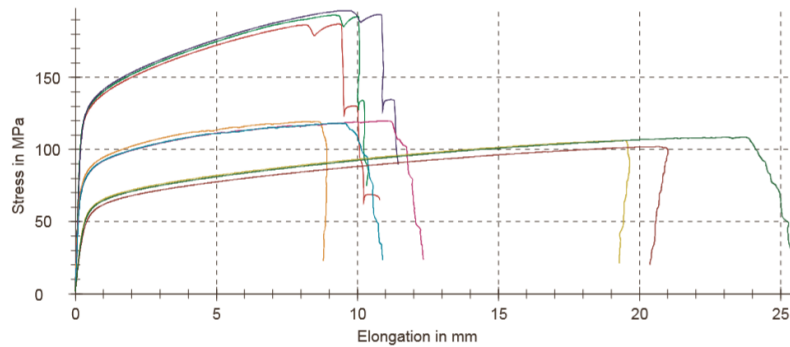
Taulukossa 2 on esitetty simuloitujen kappaleiden tulokset, joita voidaan verrata käytännön kokeen tuloksiin.

Taulukko 2. Simuloitujen vetokokeiden tulokset.

Rakenne	$\rho$	$R_{MAX}$	$\Delta l$	Yksikkö kennon koko	Palkin koko	F	$A_{min}$	$R_{5000N}$
	%	Mpa	mm	mm	mm	N	mm	Mpa
Cube	58.9	309.01	0.018943	5	2.5	5000	38.64	130.1
Double pyramid diagonal	53.3	733.94	0.018842	5	1	5000	70.3	76.5
Hex	63.3	193.36	0.072626	2	2	5000	70	73.3

## 9.5 Vetokokeen tulokset

Vetokokeessa saadut tulokset ovat liitteessä 4 . Nämä tulokset on koottu kuvaan 40 ja taulukossa 3.



Kuva 40. Jännitys-venymäkuvaaja koekappaleista

Taulukko 3. Koekappaleiden vetokoetulokset.

Rakenne	E	R <sub>p0.2</sub>	R <sub>m</sub>	A <sub>gt (corr.)</sub>	A <sub>g</sub>	A <sub>t (corr.)</sub>	A <sub>100</sub>	L <sub>0</sub>	L <sub>c</sub>	a <sub>0</sub>	b <sub>0</sub>	t <sub>Test</sub>	A <sub>min</sub>	F	R <sub>p0.2,tod</sub>	R <sub>5000N</sub>
	GPa	MPa	MPa	%	%	%	%	mm	mm	mm	mm	s	mm <sup>2</sup>	N	MPa	Mpa
Hex 1	55.6	121.3	187	11.7	11.3	13.5	13.4	80	120	10.1	19.9	13.2	70	24261	346.6	71.4
Hex 2	51.8	123.6	193	11.5	11.1	12.9	12.8	80	120	10.0	20.0	13.8	70	24724	353.2	71.4
Hex 3	47.3	124.6	196	11.9	11.5	14.3	14.1	80	120	10.0	19.9	13.9	70	24929	356.1	71.4
Cube1	45.3	79.4	119	10.7	10.4	11.0	10.9	80	120	10.0	19.9	11.8	38.64	15871	410.7	129.4
Cube 2	44.3	80.3	120	11.0	10.8	12.3	12.3	100	120	10.0	19.9	12.3	38.64	16050	415.4	129.4
Cube 3	46.7	79.9	118	9.3	9.1	10.9	10.9	100	120	10.0	19.9	10.9	38.64	15976	413.5	129.4
DP 1	18.8	57.4	106	19.5	18.9	19.3	19.2	100	120	10.4	20.2	19.9	70.3	11475	163.2	71.1
DP 2	17.8	53.3	102	20.7	20.1	20.4	20.3	100	120	11.0	20.4	20.1	70.3	10654	151.6	71.1
DP 3	18.6	56.4	109	23.2	22.6	25.5	25.4	100	120	10.6	20.2	23.4	70.3	11288	160.6	71.1

## 10 TULOSTEN TARKASTELU

### 10.1 Ristikkorakenteiden vertailun tulokset

Suuri määrä ristikkorakenteita verrattiin keskenään, jotta saataisiin eri rakenteista mahdollisimman paljon tietoa. Tulokset ovat hyvin vertailukelpoisia keskenään, koska kennojen koko ja palkkien paksuudet olivat yhtä suuret, sekä vaikuttavat voimat simuloinnissa olivat samat. Vertailussa erottuivat double pyramid diagonal, cube ja hex rakenteet.

Double pyramid diagonal rakenteessa huomioitava tekijä on kaikista pienin siirtymä. Tämä tulos antaisi ymmärtää rakenteen hyvin jäykäksi. Maxwell vakauskriteeri mukaan rakenne on jännitys-hallittu ja tämäkin osoittaa rakenteen olevan jäykkä. Ulkoisesti tarkastelussa rakenne on monimutkainen, jonka johdosta rakennetta voi kuormittaa suunnasta riippumatta ja saada samat tulokset. Monimutkaisen rakenteen takia myös suhteellinen tiheys pysyy korkeana 0,568.

Suhteellinen tiheys oli pienin cube:lla, joten se on kevyin rakenne. Tuloksetkin osoittavat sen olevan heikoin ja siirtymä on suurin. Maxwellin vakauskriteeri mukaan rakenne on taivutus-hallittu rakenne ja tuloksetkin antavat samanlaisia vastauksia. Kuitenkin hyvin yksinkertainen rakenne ja suhteellinen tiheys oli vain 0,114.

Hex oli ainut kaksiulotteinen rakenne, joka otettiin mukaan vertailuun. Rakennetta ei pystytty täysin vertaamaan ristikkorakenteisiin, mutta tuloksista näkee sen hyvyyden. Siirtymät olivat pieniä ja suhteellinen tiheys oli 0,436. Maxwell vakauskriteeri mukaan rakenne on taivutus-hallittu rakenne.

### 10.2 Materiaalimallin tulokset

Materiaalimallin tarkoituksena on verrata samaa kuormitustapausta geometriseen malliin, jotta sitä pystytään hyödyntämään suurempiin laskentoihin. Geometrisen mallin ja materiaalimallin siirtymiä verrataan toisiinsa. Tulokset osoittavat, että mallit käyttäytyvät hyvinkin samantapaisesti ja siirtymät olivat melkein identtiset. Pienet erot voidaan selittää verkotuksella. Tarkemmalla verkotuksella tulokset olisivat olleet



vieläkin lähempänä toisiaan, ellei jopa samat. Tämän perusteella materiaalimallin käyttöä voidaan tulevaisuudessa hyödyntää.

### **10.3 Ristikkorakenteen optimoinnin tulokset**

Optimoinnin tulokset olivat odotettuja, koska rakenne ja yksikkökennon koko oli valmiiksi valittu. Optimointi pystyi vaikuttamaan vain palkkien kokoon. Kuvassa 38 huomataan yksikkökennon palkkien kasvavan päätyjä kohden. Optimoinnin tarkoituksena oli enemmänkin havainnollistaa ristikkorakenteiden optimointia, jotta tulevaisuudessa ymmärrettäisiin sen käyttäytymistä. Eli kennonrakenteella ja sen koolla on suuri vaikutus optimointiin.

### **10.4 Vetokokeen simulointituloksien vertailu kokeelliseen**

Simuloiduissa koekappaleissa huomattiin heti alussa monimutkaisten rakenteiden laskennan kesto. Kuitenkin hyödyntämällä geometriaa laskenta aikoja saatiin pienennettyä. Tämä oli hyvä havainnollistaa, jotta tulevaisuudessa vastaavissa tilanteissa voidaan hyödyntää materiaalimallia.

Käytännön kokeen tulokset onnistuivat hyvin. Tämä näkyy kuvaajassa 40, jossa eri rakenteet käyttäytyvät hyvinkin pitkälti samalla kaltaisesti. Tämä kertoo 3D tulostuksen tasaisesta laadusta. Lopussa näkyvät erot johtuvat kappaleen katkeamista mittausalueen ulkopuolelta.

Käytännön kokeet verrattuna simulointimalleihin onnistui hyvin. Tulokset ovat hyvinkin lähellä toisiaan, kun verrataan jännityksiä ja erot voidaan selittää pinnanlaadulla. Pienemmissä rakenteissa pinnan laatu voi vaikuttaa enemmän, mutta suuremmissa rakenteissa sen vaikutus vähenee. Simulointimalleihin olisi voinut huomioida tämän ja sen seurauksena tulokset olisivat olleet vieläkin lähempänä toisiaan. Tulokset ovat sen verran lähellä toisiaan, että vertailu voidaan todeta onnistuneeksi.

## 11 JATKOKEHITYSEHDOTUKSET

Työn edetessä suurimmaksi haasteeksi alkoi muodostua tiedostojen suuri koko. Tämä johtui siitä, että ristikkorakenteen monimutkainen geometria vaati paljon tallennustilaa. Tämä aiheutti laskennan hidastumisen ja välillä jopa laskennan kaatumisen. Geometrian muokkaamien oli tällöin vaikeaa tai mahdotonta. Tätä ongelmaa pystyttiin kiertämään lisäämällä ristikkorakenne viimeisenä malliin. Simulointiin tämän vaikutus näkyi laskenta-ajan kasvussa. Laskentaa pystyttiin kuitenkin yksinkertaistamaan symmetrian avulla, jotta saatiin tulokset laskettua. Olisi siis hyvä miettiä parempaa ratkaisua esimerkiksi ohjelmia vertaamalla. Ohjelma voisi keskittyä paremmin ristikkorakenteisiin ja niiden mallintamiseen siten, että rakenne voitaisiin mallintaa vaikka yksinkertaisilla sauvoilla, joille annetaan erikseen määritetty geometria.

3D-tulostamisessa tulisi huomioida myös muitakin tekijöitä, jotta se saataisiin kannattavammaksi. Tukirakenteiden käyttö ja niiden optimointi olisi tärkeää, koska niiden suunnittelulla saataisiin nopeutettua tulostusta. Tällaisia tapauksia pystytään jo nyt optimoimaan ja simuloimaan. Olisikin tärkeää saada tietoutta kyseisistä mahdollisuuksista.

Tulostamisessa tulisi myös huomioida tulostettavan kappaleen asettelu. Tämä vähentäisi tarvittavien tukien määrää, jonka ansiosta säästettäisiin materiaaleissa ja nopeutettaisiin entisestään tulostusprosessia. Tulostusohjelma antaa nykyisellään valmistukseen menevän ajan, jota pystytään tarkkailemaan kun kappaletta sovitellaan optimaaliseen asentoon.

Tulostuksen simulointi olisi myös hyödyllinen kohde tarkastella lähemmin. Tämän etuna olisi valmistuksessa tulevien virheiden välttäminen. Pystyttäisiin ennakoimaan valmistusvirheet ja korjata ne ennen kuin edes alettaisiin tulostaa. Samalla pystyttäisiin katsomaan tarvittavien tukien paikat ja vähentämään tukia siellä missä niille ei ole tarvetta.

## 12 YHTEENVETO

3D-tulostuksen yleistyminen ja sen mahdollisuudet aiheuttivat mielenkiinnon aiheeseen. Tulostimia on erilaisia ja erilaisilla teknologioilla, jotka ovat eri käyttötarkoituksiin ja eri materiaaleille tehty. Monipuolisuuden ja ennen kaikkea materiaalien laajan valikoiman ansiosta teollisuus on kiinnostunut 3D-tulostamisen mahdollisuuksista.

Ristikkorakenteiden erilaisten rakenteiden määrittäminen oli tärkeää, jotta saatiin selville ominaisuudet. Rakenteet jaettiin kaksiulotteisiin ja kolmiulotteisiin rakenteisiin, joita verrattiin Maxwellin vakauskriteerillä. Vakauskriteeri jakoi rakenteet taivutus-hallittuihin ja jännitys-hallittuihin rakenteisiin.

3D-tulostamisessa valittiin paras tämän hetkinen tulostustekniikka metallin tulostamiselle. Uuden tekniikan takia oli hyvä myös tutustua suunnittelijan näkökulmasta tekijöihin, joiden avulla pystytään vaikuttamaan tulostamiseen.

Suunnittelussa verrattiin käytettävissä olevia työkaluja ja niiden toimivuutta. Kaikista menetelmistä saatiin tietoa, miten niitä käytetään ja mihin ne soveltuvat parhaiten. Käytännön kokeiden avulla verrattiin simuloituja malleja keskenään, jotta voidaan luottaa valmiin kappaleen ja simuloidun kappaleen olevan samanlaisia.

## LÄHDELUETTELO

Nguyen J. Park S. Rosen D. Folgar L. Williams J. (2012)

Conformal Lattice Structure Design and Fabrication [chrome-](#)

[extension://oemmndcbldboiebfnladdacbfmadadm/https://pdfs.semanticscholar.org/2a95/41d8c42e31640140a07b677f6e00665f5dba.pdf](https://pdfs.semanticscholar.org/2a95/41d8c42e31640140a07b677f6e00665f5dba.pdf) [20.2.2019].

Illgner M. Schäuble A. Binder M. Urban N. Schlick G. (2017) Design of lattice and honeycomb structures for laser beam melting

Azman A. (2017) Method for integration of lattice structures in design for additive manufacturing [chrome-](#)

[extension://oemmndcbldboiebfnladdacbfmadadm/https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01688758/document](https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01688758/document) [20.2.2019]

Mahmoud D. Elbestawi M. (2017) Lattice Structures and Functionally Graded

Materials Applications in Additive Manufacturing of Orthopedic Implants [chrome-](#)

[extension://oemmndcbldboiebfnladdacbfmadadm/https://res.mdpi.com/d\\_attachment/jmmp/jmmp-01-00013/article\\_deploy/jmmp-01-00013.pdf](https://res.mdpi.com/d_attachment/jmmp/jmmp-01-00013/article_deploy/jmmp-01-00013.pdf) [20.2.2019]

Rosen D. Johnston S. Reed M. (2006) Design of general lattice structures for lightweight and compliance applications

[chrome-](#)

[extension://oemmndcbldboiebfnladdacbfmadadm/https://smartech.gatech.edu/bitstream/handle/1853/33037/LatticeAnl\\_DWR\\_RM2006.pdf](https://smartech.gatech.edu/bitstream/handle/1853/33037/LatticeAnl_DWR_RM2006.pdf) [20.2.2019]

Azman A. (2017) Method for integration of lattice structures in design for additive manufacturing [chrome-](#)

[extension://oemmndcbldboiebfnladdacbfmadadm/https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01688758/document](https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01688758/document) [22.2.2019]

Wang A, Kumar R, and McDowell D (2005) Mechanical Behavior of Extruded Prismatic Cellular Metals [chrome-](#)

extension://oemmnecbldboiebfnladdacbfmadadm/http://www.me.utexas.edu/~ppmdla  
b/files/MD061193.Multifn.topology.10.24.06.pdf [12.3.2019]

Gibson L. and Ashby M. (2001) Cellular Solids: Structure and Properties

[https://books.google.fi/books?hl=fi&lr=&id=rzVIBAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR7&dq=Cellular+Solids:+Structure+and+Properties&ots=gwcz7Z2ryU&sig=jMOcDtJC5ljw3s2SH5GYCv1Dr8&redir\\_esc=y#v=onepage&q=Cellular%20Solids%3A%20Structure%20and%20Properties&f=false](https://books.google.fi/books?hl=fi&lr=&id=rzVIBAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR7&dq=Cellular+Solids:+Structure+and+Properties&ots=gwcz7Z2ryU&sig=jMOcDtJC5ljw3s2SH5GYCv1Dr8&redir_esc=y#v=onepage&q=Cellular%20Solids%3A%20Structure%20and%20Properties&f=false) [30.3.2019]

Tang Y. and Zhao Y.(2015) Lattice-skin Structures Design with Orientation Optimization

<chrome-extension://oemmnecbldboiebfnladdacbfmadadm/http://sffsymposium.engr.utexas.edu/sites/default/files/2015/2015-111-Tang.pdf> [06.07.2019]

Yang L, Harrysson O, Cormier D, West H, Zhang S, Gong H, Stucker B (2016) Design for Additively Manufactured Lightweight Structure: A Perspective

<chrome-extension://oemmnecbldboiebfnladdacbfmadadm/http://sffsymposium.engr.utexas.edu/sites/default/files/2016/173-Yang.pdf> [26.01.2020]

Maskery I, Sturm L, Aremu A, Panesar A, Williams C, Tuck C, Wildman R, Ashcroft I, Hague R (2017) Insights into the mechanical properties of several triply periodic minimal surface lattice structures made by polymer additive manufacturing:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032386117311175> [15.03.2019]

Han S, Choi J, Liu G & Kang K (2017) A Microscopic Shell Structure with Schwarz's

D-Surface <https://www.nature.com/articles/s41598-017-13618-3> [15.03.2019]

Ashby M. (2005) The properties of foams and lattices

[chrome-extension://oemmnecbldboiebfnladdacbfmadadm/https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/58889556/gibson-ashby\\_model.pdf?response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DThe\\_properties\\_of\\_foams\\_and\\_lattices.pdf&X-Amz-Algorithm=AWS4-HMAC-SHA256&X-Amz-Credential=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A%2F20200128%2Fus-east-1%2Fs3%2Faws4\\_request&X-Amz-Date=20200128T175330Z&X-Amz-Expires=3600&X-Amz-SignedHeaders=host&X-Amz-](chrome-extension://oemmnecbldboiebfnladdacbfmadadm/https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/58889556/gibson-ashby_model.pdf?response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DThe_properties_of_foams_and_lattices.pdf&X-Amz-Algorithm=AWS4-HMAC-SHA256&X-Amz-Credential=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A%2F20200128%2Fus-east-1%2Fs3%2Faws4_request&X-Amz-Date=20200128T175330Z&X-Amz-Expires=3600&X-Amz-SignedHeaders=host&X-Amz-)

[Signature=184d50ba06c8bf206a83de76579c3afe30837b2f1fbb48a6a3187f1c9dd15383](#)

[28.01.2020]

Bhavar V, Kattire P, Patil V, Khot S, Gujar K, Singh R (2014) A Review on Powder Bed Fusion Technology of Metal Additive Manufacturing [chrome-extension://oemmnecbldboiebfnladdacbfmadadm/https://www.researchgate.net/profile/Valmik\\_Bhavar2/publication/285982651\\_A\\_review\\_on\\_powder\\_bed\\_fusion\\_technology\\_of\\_metal\\_additive\\_manufacturing/links/570f25de08aed4bec6fdf38d/A-review-on-powder-bed-fusion-technology-of-metal-additive-manufacturing.pdf](chrome-extension://oemmnecbldboiebfnladdacbfmadadm/https://www.researchgate.net/profile/Valmik_Bhavar2/publication/285982651_A_review_on_powder_bed_fusion_technology_of_metal_additive_manufacturing/links/570f25de08aed4bec6fdf38d/A-review-on-powder-bed-fusion-technology-of-metal-additive-manufacturing.pdf) [28.01.2020]

Duda T, Raghavan V. (2016) 3D Metal Printing Technology <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896316325496> [1.2.2020]

Berger R. (2013) Additive manufacturing, A game changer for the manufacturing industry? <https://www.rolandberger.com/fr/Publications/Additive-manufacturing-2013.html> [1.2.2020]

Monaheng L, Preez W, Becker T. (2018) Validation through digital image correlation of finite element analysis used in the design of a Ti6Al4V mandibular implant [https://www.researchgate.net/figure/Direct-Metal-Laser-Sintering-Process-for-manufacturing-of-mandibular-medical-implant\\_fig3\\_331547998](https://www.researchgate.net/figure/Direct-Metal-Laser-Sintering-Process-for-manufacturing-of-mandibular-medical-implant_fig3_331547998) [1.2.2020]

Gibson I, Rosen D, Stucker B (2014) Additive Manufacturing Technologies – 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. Toinen painos, USA: Kustannusosakeyhtiö Springer: 1-10.

Kontio J. (2017) Todelliset 3D-tulostuksen hyödyt yrityksille <https://aipworks.fi/2017/03/13/todelliset-3d-tulostuksen-hyodyt/> [26.5.2020]

SFS 3475. (1986) Vetokokeen litteä kiilasauva 2. painos Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.

Metalliteollisuuden Standardisoimiskeskus TES

Vahvistettu  
1986-08-25

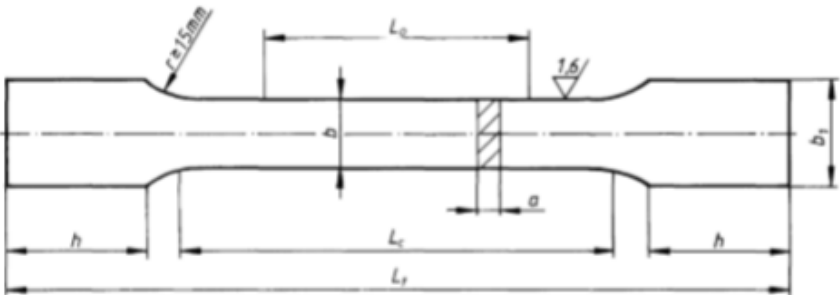
2. painos

1 (2)

COPYRIGHT © SFS. OSITTAINENKIN JULKAISEMINEN JA JÄLJENTÄMINEN SALLITTU VAIN SFS:N LUVALLA. TÄTÄ STANDARDIA MYÖ SUOMEN STANDARDISOIMISLIITTO

Korvaa standardin SFS 3475 (1975)

**VETOKOKEEN LITTEÄ KIILAISTUKKASAUVA**  
*Flat kilbackstav för dragprov*  
*Flat tensile test piece*



NIMIKE	Kiilaistukkasauva	$a \times b \times L_g$	SFS 3475
	Paksuus (mm)		
	Leveys (mm)		
	Alkumittapituus (mm)		
Esim.	Kiilaistukkasauva 10 x 20 x 80 SFS 3475		

**MITAT**

Mitat millimetreinä

Paksuus <sup>1)</sup>		Leveys <sup>2)</sup> <i>b</i>	Suhdesauvat				Alku- mittapituus <i>L<sub>s</sub></i> = 200 mm		<i>b<sub>1</sub></i>	<i>h</i> ≥
<i>a</i>			<i>L<sub>s</sub></i> = 5,65 √ <i>S<sub>s</sub></i>		<i>L<sub>s</sub></i> = 11,3 √ <i>S<sub>s</sub></i>					
alaraja	yläraja		<i>L<sub>c</sub></i> ≥	<i>L<sub>1</sub></i> ≥	<i>L<sub>c</sub></i> ≥	<i>L<sub>1</sub></i> ≥	<i>L<sub>c</sub></i> ≥	<i>L<sub>1</sub></i> ≥		
3	7,5	12	75	170	125	220	220	315	17	40
5	12	20	120	240	205	325	230	350	27	50
9	32 <sup>3)</sup>	32	240	400	420	580	260	420	40	70

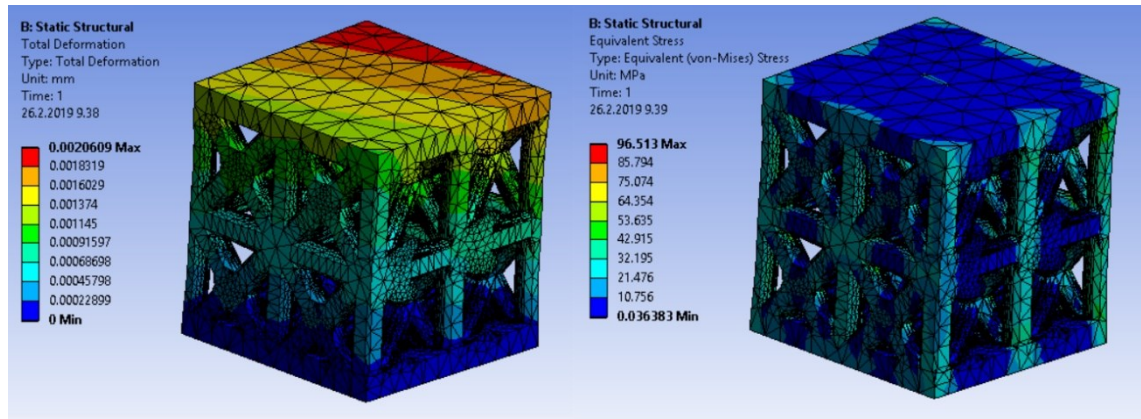
**TOLERANSSIT**Paksuuden (*a*) ja leveyden (*b*) sallittu vaihtelu koepituuden *L<sub>c</sub>* alueella:

Poikittais- mitta <i>a</i> ja <i>b</i> , mm	Sallittu vaihtelu enintään, mm		
	Leveys <i>b</i>	Paksuus <i>a</i>	
		Toinen tai molemmat leveät sivupinnat työstämättä	Kaikilta sivuilta työstetty sauva
3 ... 6	—	0,18	0,03
(6) ... 10	—	0,22	0,04
(10) ... 18	0,04	0,27	0,04
(18) ... 30	0,05	0,33	0,05
(30) ... 50	—	0,39	—

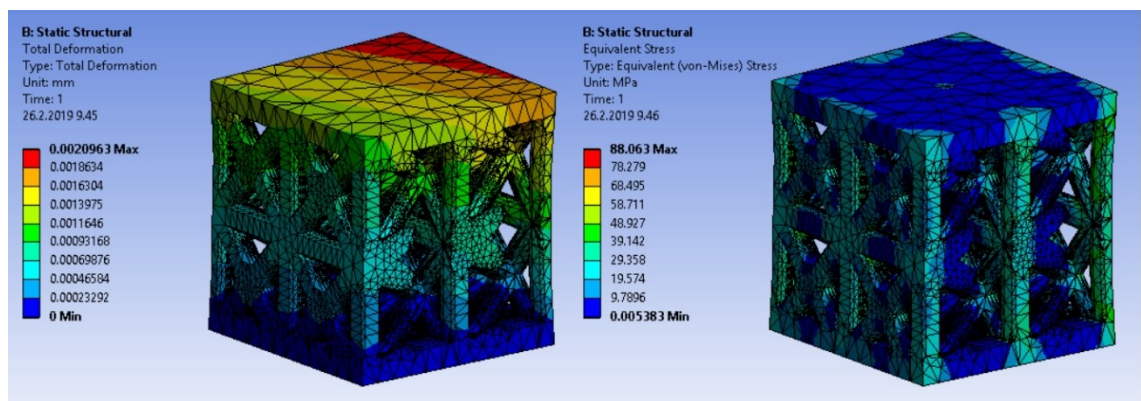
<sup>1)</sup> *a* on mikäli mahdollista, testattavan tuotteen paksuus (levy, laippa jne.).<sup>2)</sup> Nimenlismitta.<sup>3)</sup> Jos testattavan tuotteen paksuus on yli 32 mm, testataan se toisen litellin pinnan puolelta paksuuteen *a* = 30 mm, ja koesauvat valmistetaan tämän mukaisesti.



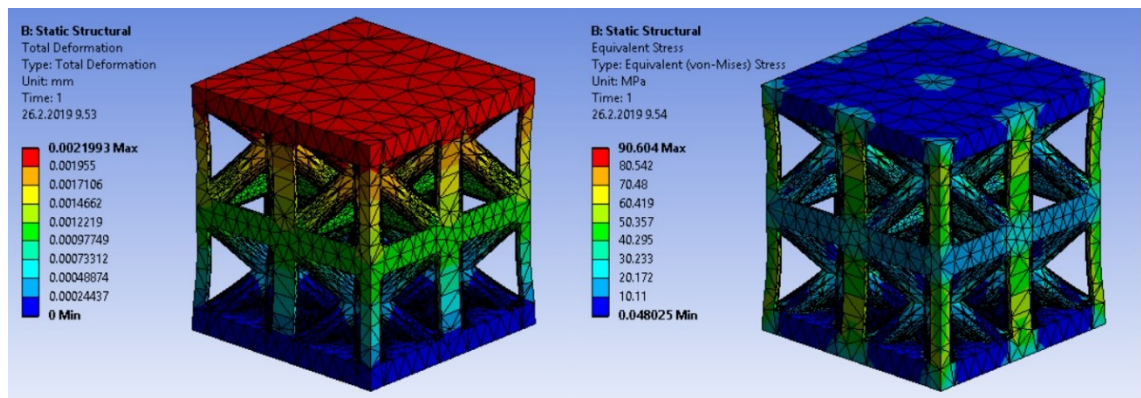
## Liite 2. (1) Ristikkorakenteiden vertailun tulokset



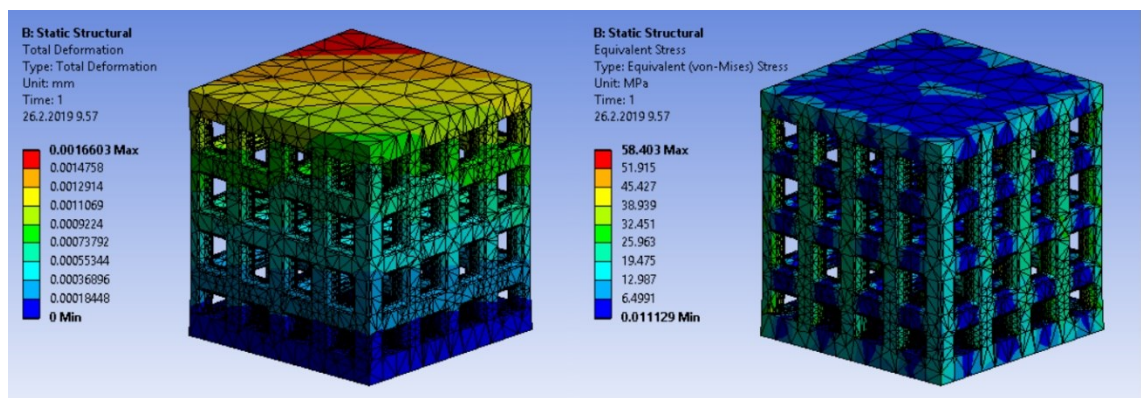
Cube lattice with bottom center



Cube lattice with bottom center without vertical supports



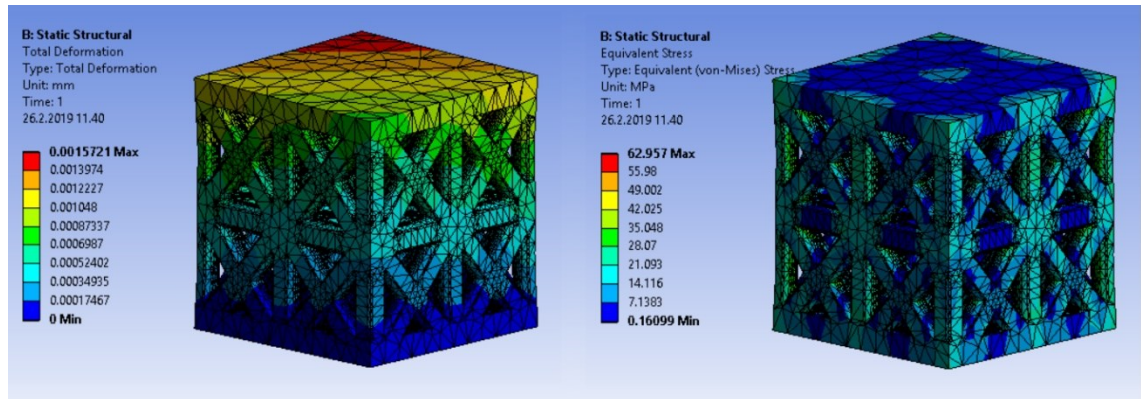
Cube lattice with center supports



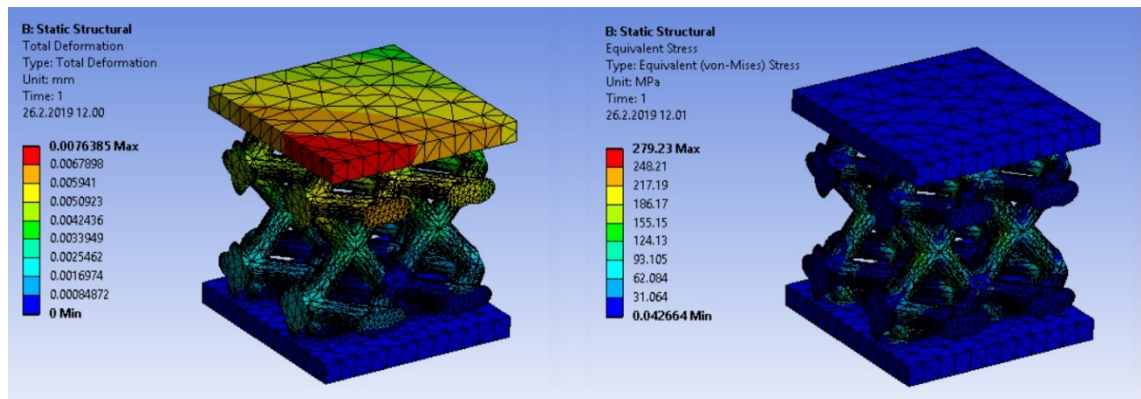
Cube lattice with side cross supports



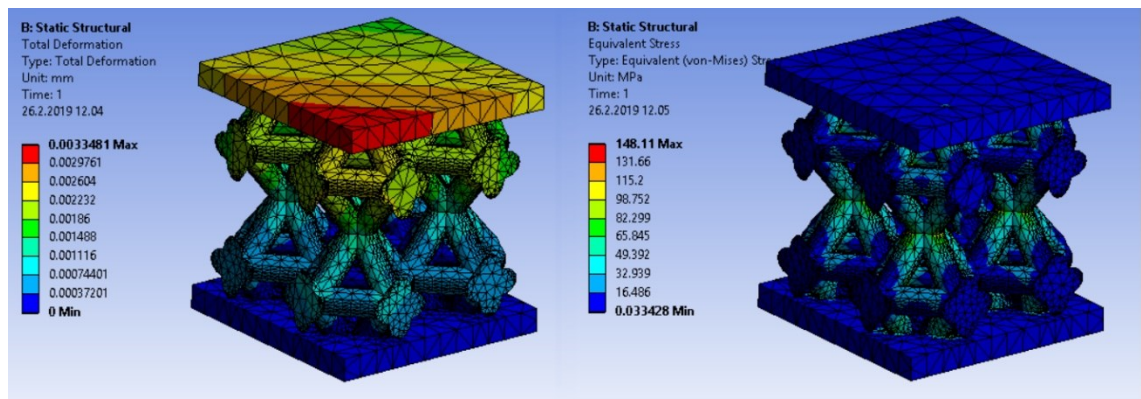
## Liite 2. (2) Ristikkorakenteiden vertailun tulokset



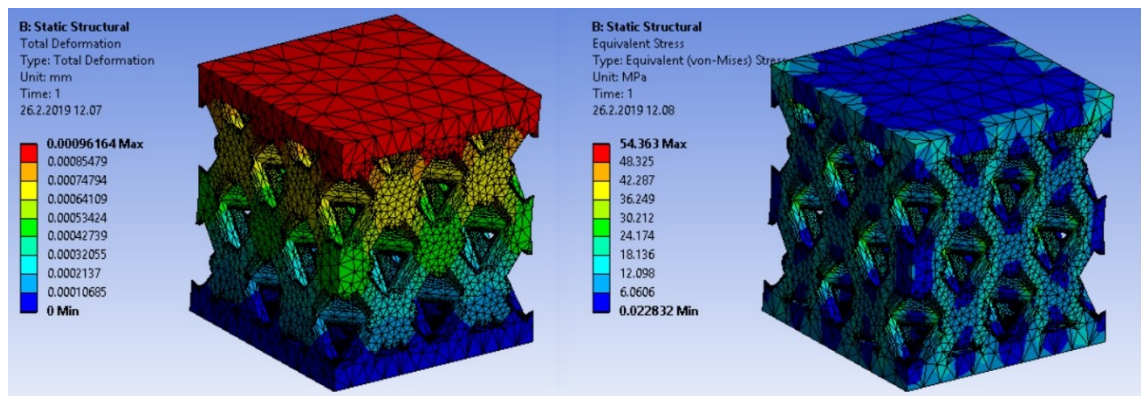
Cube lattice with side diagonal supports



Diamond lattice

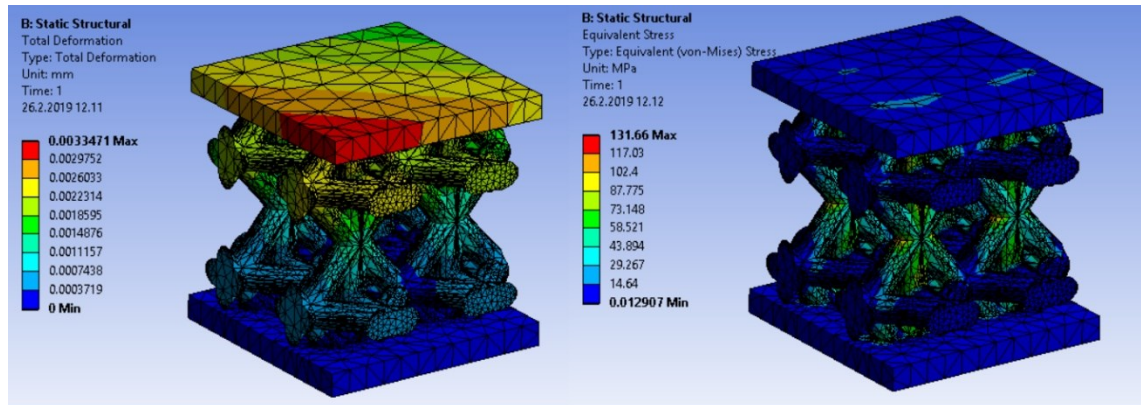


Double pyramid lattice

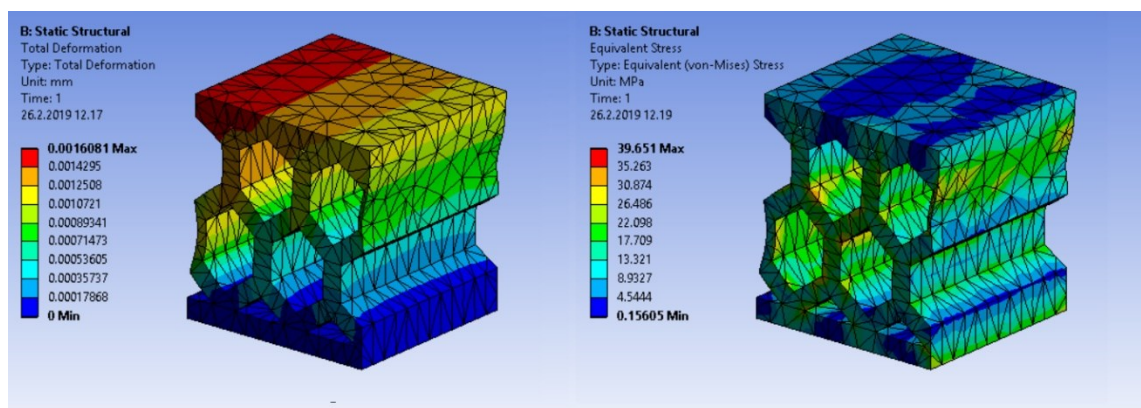


Double pyramid lattice and face diagonals

## Liite 2. (3) Ristikkorakenteiden vertailun tulokset



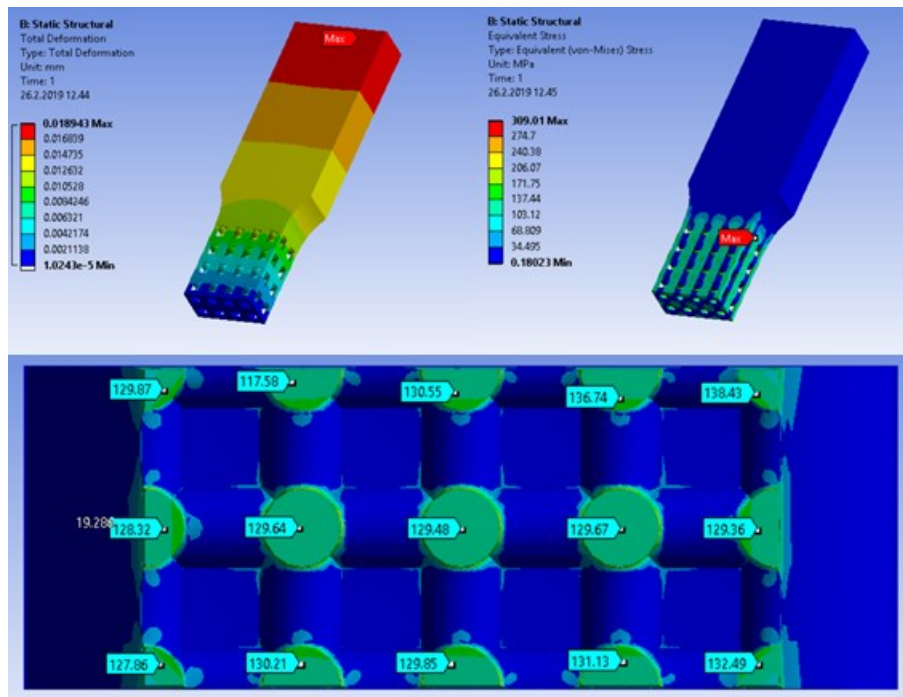
Double pyramid lattice with cross



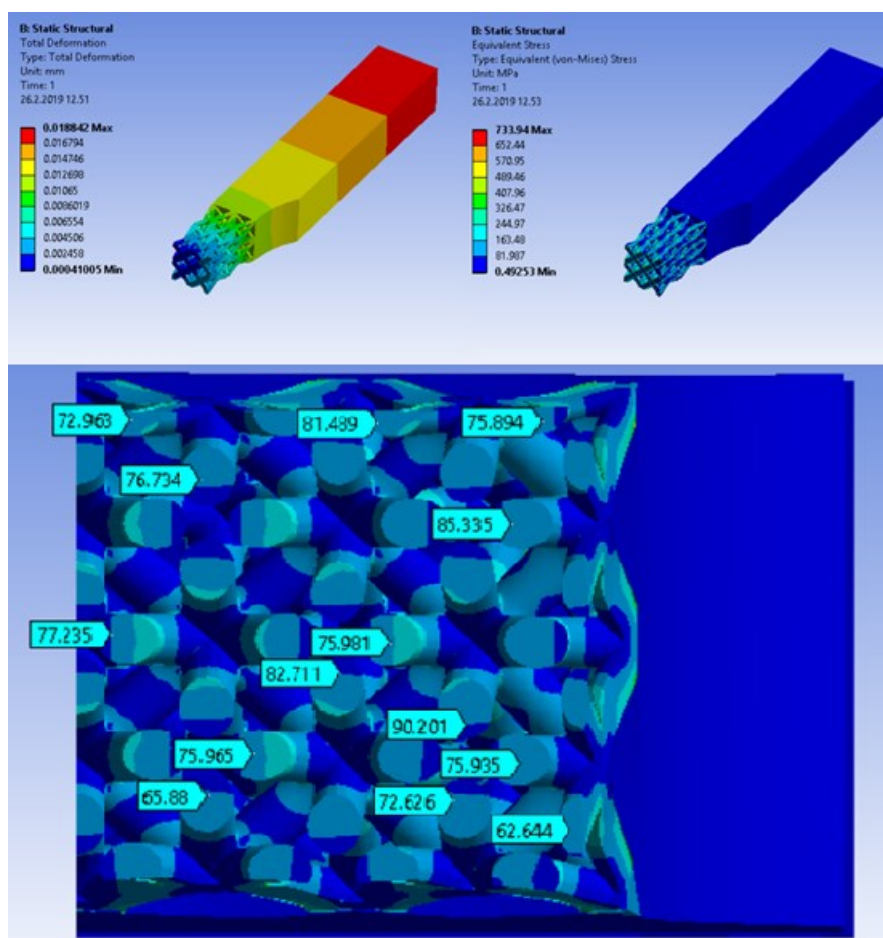
Hex



### Liite 3. Simuloitujen koekappaleiden tulokset.



Cube simuloinnin tulokset.



Cube lattice with side diagonal supports simuloinnin tulokset.

## Test report

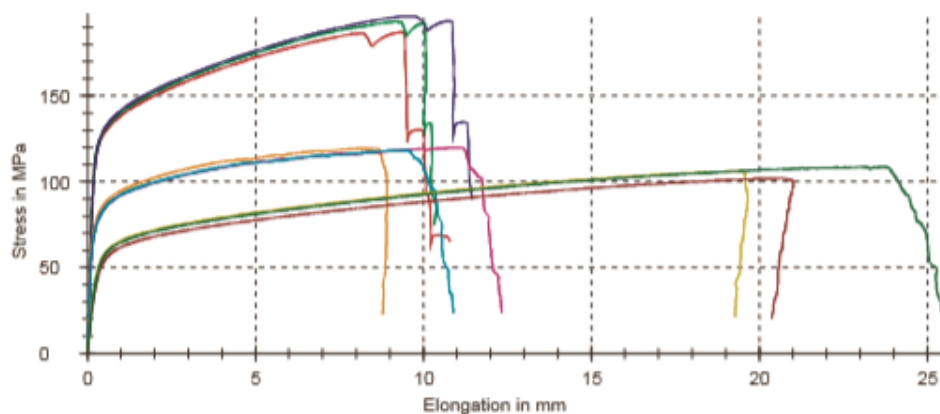
Customer : Type and designation of :  
 Job no. : Material :  
 Test standard :  
 Pre-load : 2 MPa Speed, yield point : 0,0025 1/s  
 Speed, E-Modulus : 30 MPa/s Test speed : 0,008 1/s

### Test results:

No.	Specimen no.	Specimen identifier	E GPa	R <sub>p0.2</sub> MPa	R <sub>p1.0</sub> MPa	R <sub>m</sub> MPa	A <sub>gt (corr.)</sub> %	A <sub>2</sub> %	A <sub>t (corr.)</sub> %	A <sub>100</sub> %	L <sub>0</sub> mm
1	1	Hex 1	56	121	139	187	11,66	11,32	13,5	13,4	80,00
2	2	Hex 2	52	124	141	193	11,45	11,08	12,9	12,8	80,00
3	3	Hex 3	47	125	142	196	11,88	11,47	14,3	14,1	80,00
4	4	Cube1	45	79	94	119	10,71	10,44	11,0	10,9	80,00
5	5	Cube 2	44	80	94	120	11,05	10,78	12,3	12,3	100,00
6	6	Cube 3	47	80	94	118	9,34	9,09	10,9	10,9	100,00
7	7	DP 1	19	57	68	106	19,47	18,91	19,3	19,2	100,00
8	8	DP 2	18	53	65	102	20,66	20,09	20,4	20,3	100,00
9	9	DP 3	19	56	67	109	23,17	22,58	25,5	25,4	100,00

No.	L <sub>c</sub> mm	t <sub>test</sub> s
1	120,00	13,22
2	120,00	13,77
3	120,00	13,93
4	120,00	11,82
5	120,00	12,31
6	120,00	10,95
7	120,00	19,88
8	120,00	20,14
9	120,00	23,40

## Series graph:



## Statistics:

Series n = 9	Specimen no.	E GPa	R <sub>p0.2</sub> MPa	R <sub>p1.0</sub> MPa	R <sub>eH</sub> MPa	R <sub>m</sub> MPa	A <sub>gt (corr.)</sub> %	A <sub>g</sub> %	A <sub>t (corr.)</sub> %	A <sub>100</sub> %	L <sub>0</sub> mm	L <sub>c</sub> mm	a <sub>0</sub> mm
x	5	38	86	100	-	139	14,38	13,97	15,6	15,5	91,11	120,00	10,24
s	3	15	30	32	-	40	5,18	5,05	5,0	5,0	10,54	0,00	0,3489
V) [%]	54,77	40,09	34,38	32,10	-	29,09	36,04	36,14	32,25	32,37	11,57	0,00	3,41

Series n = 9	b <sub>0</sub> mm	f <sub>test</sub> s
x	20,03	15,49
s	0,1721	4,45
V) [%]	0,86	28,70